ENCUADERNACIÓN
ENRIQUE GARCÍA
S. Mateo. 15, cuad.º

Nouvelle Collection scientifique
Directeur : Émile Borel

La Chimie de la Matière vivante

PAR

JACQUES DUCLAUX
Préparateur à l'Institut Pasteur.

FÉLIX ALCAN, ÉDITEUR

La Chimie

de

la Matière vivante

FÉLIX ALCAN, ÉDITEUR

NOUVELLE COLLECTION SCIENTIFIQUE

Directeur: ÉMILE BOREL

Volumes in-16 à 3 fr. 50 l'un.

Éléments de Philosophie Biologique, par F. Le Dantec, chargé du cours de biologie générale à la Sorbonne. 2e édition, 1 vol. in-16 . . . . . 3 fr. 50

La Voix. *Sa culture physiologique. Théorie nouvelle de la phonation*, par le Dr P. Bonnier, laryngologiste de la clinique médicale de l'Hôtel-Dieu, 3e édition. 1 vol. in-16 illustré. . . . . 3 fr. 50

De la Méthode dans les Sciences :

1. *Avant-propos*, par M. P.-F. Thomas, docteur ès lettres, prof. de philosophie au lycée Hoche. — 2. *De la Science*, par M. Emile Picard, de l'Institut. — 3. *Mathématiques pures*, par M. P. Tannery, de l'Institut. — 4. *Mathématiques appliquées*, par M. Painlevé, de l'Institut. — 5. *Physique générale*, par M. Bouasse, professeur à la Faculté des Sciences de Toulouse. — 6. *Chimie*, par M. Job, professeur au Conservatoire des Arts et Métiers. — 7. *Morphologie générale*, par M. Giard, de l'Institut. — 8. *Physiologie*, par M. Le Dantec, chargé de cours à la Sorbonne. — 9. *Sciences médicales*, par M. Pierre Delbet, professeur à la Faculté de Médecine de Paris. — 10. *Psychologie*, par M. Th. Ribot, de l'Institut. — 11. *Sciences sociales*, par M. Durkheim, professeur à la Sorbonne. — 12. *Morale*, par M. Lévy-Bruhl, professeur à la Sorbonne. — 13. *Histoire*, par M. G. Monod, de l'Institut. 2e édit., 1 vol. in-16. . . . . 3 fr. 50

L'Éducation dans la Famille. *Les Péchés des parents*, par P.-F. Thomas, professeur au lycée de Versailles. 3e édit. 1 vol. in-16 . . . . . 3 fr. 50

La Crise du Transformisme, par F. Le Dantec. 1 volume, in-16 . . . . . 3 fr. 50

L'Énergie, par le professeur W. Ostwald, Traduit de l'allemand par *E. Philippi*, licencié ès sciences, 2e édit. 1 volume in-16. . . . . 3 fr. 50

Les États physiques de la Matière, par Ch. Maurain, professeur à la Faculté des Sciences de Caen. 1 vol. in-16, illustré. . . . . 3 fr. 50

La Chimie de la Matière vivante par Jacques Duclaux, préparateur à l'Institut Pasteur. 1 volume in-16 3 fr. 50

La Chimie

de

la Matière vivante

PAR

JACQUES DUCLAUX
Préparateur à l'Institut Pasteur.

FÉLIX ALCAN, ÉDITEUR
108, BOULEVARD SAINT-GERMAIN, PARIS

1910

Tous droits de traduction et de reproduction réservés

Copyright 1910, by Félix Alcan.

AVANT-PROPOS

La seule manière vraiment scientifique de traiter la Chimie de la matière vivante consisterait à écrire, en dessous du titre « On ne sait rien », et à renvoyer la suite à une seconde édition, qui pourrait paraître dans vingt ou dans cinquante ans. Comme toutes les formules brèves, celle-ci serait un peu exagérée, mais je n'en connais pas qui puisse donner une idée plus exacte de l'état de nos connaissances, sur ce sujet. C'est dire que les chapitres qui suivent ont pour but beaucoup plutôt de poser des questions que de les résoudre.

La chimie de la matière vivante n'a aucune prétention philosophique, et elle s'inspire de préoccupations d'un ordre tout à fait différent. Elle ne veut tenir ses ressources que du laboratoire, et néglige tout ce qui n'est pas appuyé sur des expériences. Là où celles-ci manquent, elle se tait, ou bien elle indique

timidement quelques analogies dont l'avenir pourra peut-être tirer quelque clarté. A l'inverse de la philosophie, elle ne prétend pas offrir un système complet de connaissances, et, là où elle voit un trou sur son chemin, elle n'essaie pas de faire le tour. Comme ces trous sont innombrables, la route qu'elle suit est coupée en beaucoup de petits morceaux, à chacun desquels elle doit consacrer un paragraphe si elle veut traiter le sujet à fond.

Je n'ai pas cherché à le faire ; j'ai choisi le long du chemin un certain nombre de points de vue et j'ai groupé ceux qu'entourait un même horizon. Le lien qui les unit dans un même chapitre est, suivant l'occasion, ou bien serré ou bien assez lâche ; et, si l'on me reproche que la lecture de quelques-uns de ces chapitres laisse l'esprit un peu décousu, je répondrai seulement que le lecteur et moi sommes nés trop tôt.

LA CHIMIE
DE
LA MATIÈRE VIVANTE

CHAPITRE PREMIER
LES LOIS DE LA CHIMIE

On rencontre souvent, dans les ouvrages qui traitent de la chimie à un point de vue général, et principalement dans ceux dont les auteurs ne sont pas chimistes, l'expression *les lois de la chimie*. Ainsi, pour prendre un exemple dans le sujet même qui nous occupe, on fait un mérite aux savants du siècle dernier d'avoir ramené aux lois de la chimie les phénomènes qui se produisent dans l'organisme des êtres vivants. Il ne sera donc pas inutile, avant de commencer l'étude de ces phénomènes, d'examiner de plus près ces lois et de nous demander jusqu'à quel point elles peuvent nous servir.

Je ne crois rien exagérer, ou presque rien, en disant que la plupart des chimistes, même des plus éminents, ignorent quelles sont ces lois, et qu'ils hésiteraient à en donner l'énoncé avant d'avoir consulté les manuels élémentaires où

elles sont énumérées. Dans le cours de leurs travaux, ils n'en parlent jamais : jamais on ne voit le chercheur embarrassé les appeler à son aide, soit pour expliquer, soit pour prévoir. Il faut donc que ces lois soient d'une espèce bien particulière.

Pour les apprécier à leur juste valeur, il suffit de les comparer à celles de la science que l'on rapproche le plus volontiers de la chimie, la physique. Une des lois physiques les plus remarquables, et qui résume en elle le plus de faits, est la loi de Descartes, qui donne la direction d'un rayon lumineux après qu'il a traversé une surface réfringente, et s'écrit ainsi :

$$\sin i = n \sin r$$

Cette loi résume, en effet, l'optique géométrique. La connaissant, on peut déterminer la marche d'un rayon lumineux à travers un nombre quelconque de surfaces de forme quelconque : on peut faire toute la théorie de la lentille, des lunettes et du microscope : on peut prévoir avec une parfaite exactitude le fonctionnement d'un appareil de construction donnée, ou déterminer la construction qu'il doit avoir pour donner le résultat que l'on désire. Si, au contraire, on ne la connaît pas, impossible de résoudre le problème de réfraction le plus simple.

Une autre loi physique d'une grande généralité est la loi d'Ohm,

$$E = IR$$

qui résout les questions relatives à la distribu-

tion des courants continus. Jointe à la la loi de Joule et à la loi de Neumann, qui donne la grandeur de la force électro-motrice d'induction en fonction du flux, elle permet de traiter les cas les plus complexes d'induction ; et elle est, en même temps, indispensable à la résolution du problème le plus élémentaire. Existe-t-il en chimie des lois rendant les mêmes services que celles de Descartes, d'Ohm ou de Joule? des lois sans lesquelles on ne puisse rien faire, avec lesquelles on puisse passer partout?

La première loi de la chimie est, si l'on en croit les manuels cités plus haut, celle de la conservation de la masse[1]. On peut l'énoncer ainsi : *Les réactions qui se produisent dans une enceinte fermée ne changent pas le poids de cette enceinte.* Cet énoncé n'est peut-être pas inattaquable, mais il a l'avantage de correspondre exactement à la seule vérification expérimentale précise[2] que l'on ait faite de la loi de conservation (Landolt). Au point de vue des recherches chimiques, la forme suivante peut être considérée comme équivalente, et elle est plus facilement applicable à la pratique :

Le poids d'un composé est égal à la somme des poids des composants.

Je dis que cette forme est plus pratique pour les raisons suivantes. Les expériences de Landolt ont consisté à peser, avant et après réaction, des

1. Ou, plus exactement, de la conservation du poids. Je ne crois pas que la conservation de la masse ait été vérifiée exactement. Ce serait possible, avec une machine d'Atwood très perfectionnée.

2. La précision obtenue est de l'ordre du millionième.

vases scellés contenant des substances susceptibles de réagir les unes sur les autres (fer et sulfate de cuivre par exemple), de façon à voir si le poids total avait changé. C'est uniquement ce genre d'expériences que vise le premier énoncé. Or, si beaucoup de réactions s'effectuent en tube scellé, il n'arrive jamais que l'on se préoccupe de peser avec rigueur le tube ni son contenu, l'objet de ces réactions étant la préparation de corps que l'on ne peut obtenir d'une autre manière et dont le poids exact importe peu. Au contraire, le deuxième énoncé est adapté à un grand nombre d'expériences, mais ces expériences sont d'un type unique : ce sont des expériences d'analyse chimique, celles que l'on appelle les *analyses par différences*.

Déterminer la composition d'un corps est l'un des problèmes qui se présentent le plus souvent en chimie. Ce corps est formé de plusieurs éléments : pour en connaître la composition, il suffit de déterminer la nature et les proportions relatives de ces éléments. Or, il arrive fréquemment qu'ils peuvent tous être dosés exactement sauf un : dans ce cas on fait la somme des poids des éléments déterminés, on la retranche du poids total et on admet que la différence est le poids du dernier. Les analyses par différence ont quelquefois pour but la détermination d'un poids atomique : mais c'est en chimie organique qu'elles rendent les plus grands services, car dans les composés de carbone, hydrogène et oxygène on ne dose jamais que les deux premiers, en raison des difficultés que présenterait la détermination

directe de l'oxygène, et ce dernier est calculé par différence.

En faisant ceci, on applique directement le deuxième énoncé de la loi de conservation de la masse.

Cette loi est donc utile aux recherches chimiques : mais — et c'est là que je voulais en venir — elle ne peut à aucun degré être considérée comme une des lois de la chimie.

En effet, la chimie laisse entièrement de côté l'étude des propriétés qui sont communes à *tous* les corps, et la conservation de la masse est justement une de ces propriétés. De même qu'une loi mathématique doit exprimer le rapport de deux propriétés mathématiques, et une loi physique le rapport de deux propriétés physiques (par exemple, pour la loi de Descartes, le rapport entre les propriétés du rayon lumineux et celles d'un milieu transparent) : une loi chimique doit exprimer le rapport entre deux propriétés chimiques, ce qui n'est pas le cas ici. La loi de conservation de la masse est, en réalité, une loi purement physique : elle est seulement *spécialement adaptée* à un certain genre de recherches chimiques.

Une comparaison fera mieux comprendre ce que je veux dire. La somme des angles d'un triangle est égale à deux angles droits : ceci est une vérité géométrique, et il ne viendrait à l'idée de personne d'en faire une loi astronomique ou géodésique. Cependant, on s'en sert constamment en astronomie ou en géodésie, pour évaluer les angles aux sommets desquels on ne peut venir se placer. On

mesure les deux autres, on en fait la somme, on la retranche de deux angles droits : et la différence est le troisième. Ces opération sont parallèles à celles qu'exécute le chimiste dans ses analyses organiques. Parmi les vérités mathématiques, celle qui donne la somme des angles d'un triangle est particulièrement adaptée à l'astronomie ou à la géodésie, mais elle n'en fait pas partie, parce qu'elle est beaucoup plus générale. Il en est de même de la chimie et de la loi de conservation, car on voit de suite, sans que j'aie besoin d'insister, que celle-ci embrasse tous les phénomènes de la nature quels qu'ils soient, et que l'aéronaute, lorsqu'il lâche du lest pour monter, l'applique comme le chimiste au cas qui l'intéresse.

Les deux autres lois générales de la chimie, — loi de Dalton ou des proportions définies, loi de Richter ou des proportions multiples — se résument dans la possibilité d'assigner aux éléments des poids atomiques. A chaque élément correspond un nombre : à l'hydrogène correspond le nombre 1, à l'oxygène 16, au soufre 32, etc. Dans tout composé, les poids des éléments seront entre eux comme des multiples de ces nombres ; ainsi l'eau contient 2 d'hydrogène et 16 d'oxygène ; l'acide sulfurique 32 de soufre, 64 d'oxygène et 2 d'hydrogène : et ainsi de suite, pour tous les composés que nous pouvons obtenir à l'état de pureté.

Ces deux lois ont, il ne faut pas l'oublier, un caractère assez hypothétiqne. Alors que la loi de conservation de la masse est vérifiée au moins au millionième, il n'y a que bien peu de cas où

celles de Dalton et de Richter l'aient été au millième. Pour les éprouver il faut, en effet, effectuer des dosages très précis : ces dosages sont presque toujours difficiles, et, en raison d'erreurs expérimentales inévitables, ne conduisent jamais à des multiples entiers. L'eau H^2O contient, pour 2 d'hydrogène, 16 d'oxygène : l'eau oxygénée H^2O^2 devrait contenir, pour 2 d'hydrogène, 32 d'oxygène, mais il n'y a réellement aucune preuve qu'elle n'en contient pas 31,9 ou 32,1 ou un nombre quelconque compris entre ces limites. L'expérience a simplement prouvé que ce nombre était très voisin de 32 ou de deux fois 16, et nous pensons que cette coïncidence, répétée pour un grand nombre d'autres composés, ne peut être un effet du hasard : nous admettons alors 32 exactement. C'est le même procédé qu'emploient les candidats au baccalauréat lorsque, ne trouvant pas à la fin de leurs calculs un nombre entier pour le résultat demandé, ils se persuadent de s'être trompés et donnent le coup de pouce nécessaire pour le ramener à ce qu'il *doit* être.

Pas plus que le leur, notre procédé n'est satisfaisant ; il revient à admettre que les rapports sont simples, parce que nous n'avons aucune raison de supposer le contraire. Ces raisons peuvent venir un jour, et les lois de proportions ne seront plus que des approximations. Leur fortune est née de l'hypothèse des atomes insécables, parce qu'elles découlent naturellement de cette hypothèse ; mais, à un moment où les idées sur la constitution de l'atome sont tout à

fait changées, et où on se demande si cet atome n'est pas lui-même un système très compliqué, on a bien le droit de les considérer avec quelque scepticisme.

Nous rencontrons ici un fait assez singulier. Il est prouvé expérimentalement que les lois de proportions sont *approchées*, il ne l'est pas qu'elles soient *rigoureuses*. Or, comme lois approchées, elles ne peuvent rendre aucun service : elles en ont rendu d'énormes, au contraire, comme lois rigoureuses, c'est-à-dire, eu égard à ce qui vient d'être dit, comme hypothèses. C'est à ce titre en effet qu'elles ont permis et permettent encore de suppléer à l'imperfection de nos méthodes d'analyse. Supposons, par exemple, qu'il s'agisse de déterminer la composition de l'urée : les méthodes les plus exactes et les expérimentateurs les plus habiles n'aboutiront pas à des nombres simples, mais les résultats bruts des calculs seront par exemple :

$$C^{1.002}\ O\ N^{1.97}\ H^{4,4}$$

Sachant, ou supposant *a priori* que les exposants sont entiers, nous n'hésiterons pas à mettre les faibles différences au compte des erreurs d'analyse, et à écrire :

$$CON^2H^4$$

L'avantage peut paraître assez mince : il est énorme en réalité. En effet, le plus grand nombre des recherches chimiques ont pour but l'étude des rapports entre les différents composés. Or,

ces relations seraient le plus souvent entièrement masquées, si l'on n'arrondissait pas les chiffres d'analyse. Personne n'aurait eu l'idée que l'éthylène pouvait, par addition d'eau, donner de l'alcool (synthèse de Berthelot), si les formules avaient été écrites conformément aux résultats bruts d'analyse, par exemple $C^{20}H^{41}$ et $C^{20}H^{59}O^{10}$. Au contraire, cette idée pouvait venir si l'on écrivait C^2H^4 et C^2H^6O, la seconde molécule contenant justement H^2O de plus que la première[1]. On trouverait des milliers d'exemples de ce genre : mais celui-ci suffit à faire comprendre de quelle immense utilité peut être l'idée préconçue, arbitraire même, l'*hypothèse* et non pas la loi des proportions rigoureuses, pour redresser les erreurs d'expérience. Il n'est certainement pas recommandable, en général, de retoucher les nombres expérimentaux pour les faire concorder avec les nombres théoriques ; mais cette petite malhonnêteté est permise ici en raison des services qu'elle a rendus et qu'elle rendra encore. La chimie organique n'existerait pas si l'on n'avait pas eu la hardiesse de la commettre.

Il semble y avoir contradiction entre ces services rendus et ce que je disais au début, qu'il était possible d'être chimiste et d'ignorer ces lois. La contradiction n'est qu'apparente, et il advient, de ces premières lois de la chimie, ce qu'il advient de beaucoup d'autres lois générales. Elles finissent par faire partie du langage cou-

1. Dans ce cas, la considération des poids moléculaires pouvait conduire au même résultat.

rant, et l'idée même qu'elles pourraient n'être pas vraies se perd. On sait que l'une des lois fondamentales de l'arithmétique est celle qui s'exprime ainsi :

$$ab = ba$$

Le produit, ou la somme de deux facteurs, ne dépend pas de l'ordre dans lequel on les place. Ces lois sont devenues inconscientes, pour ainsi dire. Elles sont nécessaires à tout calcul : elles ne sont pas utiles, c'est-à-dire qu'elles ne peuvent plus faire réaliser aucun progrès, parce qu'elles sont passées du domaine pratique de la science dans le domaine philosophique. Et si elles y sont passées, c'est parce que, ayant parfaitement résolu un problème, elles ont été reconnues impropres à la solution de tous les autres problèmes qui ont été posés ensuite, de telle sorte qu'on n'a plus jamais eu à les invoquer expressément.

Comme le mathématicien ces règles d'arithmétique, le chimiste actuel applique, par une sorte de réflexe, la loi de la conservation de la masse, toutes les fois qu'il fait une analyse par différence ; ou, dans l'étude d'un corps inconnu, les lois de proportions, lorsqu'il arrondit les nombres trouvés, instinctivement, comme on fait disparaître les centimes des comptes entre particuliers. C'est que ces lois ont résolu un problème, celui des rapports de composition entre des substances différentes. Mais elles l'ont résolu d'une manière si complète[1] qu'il ne s'est plus

1. Au moins tant que leur exactitude ne sera pas formellement

jamais posé depuis, et que le souvenir même du temps où il était discuté a disparu de notre mémoire. Les notions de proportions ont été, au début de la chimie, une acquisition précieuse, comme l'avait été auparavant la notion d'élément chimique, à laquelle nous sommes si habitués, et que pourtant nos devanciers n'ont atteinte qu'au prix de très longs efforts. Peut-on dire qu'elles soient inutiles? Assurément non, et pour bien des raisons dont j'ai indiqué quelques-unes. Peut-on dire que ce sont, à l'heure actuelle, comme les lois de physique dont je parlais, des instruments de recherches, qu'elles sont nécessaires et suffisantes à la solution des problèmes que nous sommes conduits à nous poser ? On ne le peut pas davantage, car, depuis le moment où elles ont été établies, l'orientation des recherches chimiques a beaucoup changé.

Il ne nous suffit plus, en effet, de savoir de quels éléments sont formées les substances que nous étudions, et quels sont leurs rapports de composition : nous voudrions savoir comment elles se transforment les unes dans les autres, comment on peut en obtenir une aux dépens des autres, et pourquoi les réactions s'accomplissent dans un sens plutôt que dans le sens opposé. Les lois que nous venons d'examiner ne peuvent évidemment répondre à aucune de ces questions puisqu'elles sont toujours vérifiées, de quelque manière que s'opèrent les transformations. Elles

mise en doute. Elles redeviendraient d'actualité le jour où on prouverait qu'elles sont fausses.

sont trop générales pour nous servir de guides dans des cas particuliers, de même que par exemple les théorèmes sur les projections de vecteurs sont trop généraux pour nous montrer, le cas échéant, la route du pôle.

Parmi toutes les propriétés de l'atome, elles n'en considèrent qu'une, son poids, et elles nous apprennent qu'il est constant, quelle que soit la place qu'occupe cet atome. Il en résulte que le seul poids d'un composé peut être déduit du nombre et de la nature des éléments qui le forment. Au point de vue des transformations que ce composé doit subir, le poids est un élément de peu d'importance, et ce sont les affinités qui conduisent tout. Ce qu'il nous faudrait maintenant, c'est ce que la chimie cherche depuis plus d'un siècle sans pouvoir le trouver : des lois d'affinité.

Les propriétés d'un composé, du sulfure de carbone par exemple, ne peuvent évidemment dépendre que de trois facteurs : propriétés du soufre, propriétés du carbone, proportions relatives du soufre et du carbone ; de telle sorte que si la science était achevée, si elle avait toutes ses lois, il nous suffirait de connaître les propriétés des éléments et leurs proportions dans un composé pour en déduire toutes les propriétés de ce composé. Les traités de chimie se trouveraient réduits à une partie théorique suivie de quelques tableaux de constantes, au lieu que ce ne sont encore que des dictionnaires, comme si les propriétés des corps étaient entièrement arbitraires. Quand ce progrès sera réalisé, il sera possible de

suivre un atome dans un mélange en réaction, exactement comme nous suivons la marche d'un rayon lumineux dans un système optique ou celle d'une charge électrique dans un enchevêtrement de conducteurs. On saura déterminer *a priori*, dans les produits de la réaction, la place de chacun des atomes, c'est-à-dire la nature de tous les composés formés avec leurs proportions relatives. La prévision se réduira à l'application d'un certain nombre de formules, dont chacune exprimera une loi.

Nous n'avons encore rien de pareil, et les quelques indications que nous possédons sont très générales et très vagues : quand elles prennent une forme précise, elles nous obligent à dresser de longues listes d'exceptions. Le sulfure de carbone, formé de deux éléments combustibles, est combustible lui-même : les affinités de ses éléments pour l'oxygène se retrouvent dans le composé, comme il arrive aussi pour les hydrogènes carbonés, phosphorés, siliciés, etc. L'affinité du fluor pour l'hydrogène, le silicium ou le phosphore se retrouve aussi dans la plupart des composés de ces métalloïdes. Il ne serait pas difficile de donner un certain nombre de relations de ce genre, mais il faudrait actuellement leur laisser une forme très vague, car les cas où elles ne se vérifient pas ne sont nullement exceptionnels [1], et il est impossible actuellement d'en déduire aucune loi.

1. L'iodure cuivrique, par exemple, se décompose spontanément en iode et iodure cuivreux. L'iode étant un oxydant, et les sels cuivreux étant réducteurs, cette décomposition est inexplicable. —

C'est bien à tort aussi que l'on a donné ce nom à des règles (règles de Berthollet) qui font dépendre la possibilité des réactions de la solubilité ou de la volatilité des composés formés, car, si ces règles sont souvent exactes, beaucoup de cas leur échappent; ou encore à celles de la thermochimie, dont l'insuffisance a été reconnue.

D'ailleurs, quand bien même les règles de Berthollet ou les règles thermochimiques seraient d'application générale, elles ne résoudraient qu'une partie de la question, puisqu'elles font dépendre la possibilité ou le sens de la réaction des propriétés des produits finaux de cette réaction, et non pas des produits initiaux, de telle sorte qu'elles ne peuvent être appliquées qu'à des cas déjà étudiés. Je vois bien que le fluorure de calcium se formera dans des circonstances où le chlorure de calcium ne se formerait pas, parce que le premier est insoluble et le second très soluble au contraire : mais pour appliquer ici la règle de Berthollet, il faut que je sache d'avance que le fluorure de calcium est insoluble, donc il faut que je l'aie préparé, puisque je ne connais pas de loi qui me permette de prévoir la solubilité ou l'insolubilité d'un sel d'après la nature de ses constituants. Si je l'ai

La formation de composés extrêmement instables, tels que le chlorure d'azote, est également inexplicable. — On ne comprend pas davantage pourquoi l'or, qui résiste aux acides et aux alcalis même concentrés et chauds, se dissout dans une solution étendue et froide de cyanure de potassium : pourquoi l'hydrogène sulfuré est plus volatil que l'eau; pourquoi le chlorure de soufre, composé de deux éléments dont chacun se combine au potassium avec incandescence, est sans action sur ce métal; etc...

préparé, l'objet principal de ma recherche est atteint, et il m'importe assez peu que je sois d'accord avec la règle : j'aimerais mieux savoir pourquoi, malgré les grandes analogies du fluor et du chlore, le fluorure de calcium est insoluble et le chlorure soluble, alors que c'est justement le contraire pour les sels d'argent. La même critique pourrait être faite des règles thermochimiques ; je vois bien que l'iodure d'aluminium est combustible parce que la réaction

$$2\,Al\,I^3 + 3O = Al^2O^3 + 6\,I$$

est très fortement exothermique, et que l'iodure de plomb ou de mercure ne le sera pas parce que la réaction correspondante est endothermique : mais il faudra que j'aie préparé tous ces iodures pour en connaître la chaleur de formation, et alors j'aurai plutôt fait l'expérience que le calcul ; je serais dispensé de l'une ou de l'autre si je savais *a priori* que l'oxygène dégage plus de chaleur que l'iode en se combinant à l'aluminium et moins en se combinant au plomb ou au mercure.

En d'autres termes, les quelques règles actuellement connues ne sont pas des instruments de recherche. Elles permettent d'établir des classifications, c'est-à-dire de grouper ensemble un certain nombre de phénomènes semblables ; elles en dégagent l'élément commun ou les conditions générales, mais elles n'en peuvent faire prévoir aucun, car elles n'établissent aucun rapport entre les propriétés, dans des directions différentes, d'un même élément ou d'un même composé. Ces

propriétés ne peuvent cependant être absolument indépendantes les unes des autres; mais ce qu'on a proposé jusqu'ici pour en abréger la liste n'a pas réussi.

Revenons maintenant à la matière vivante. Comme je le disais au début, on entend dire bien souvent que ses transformations ont été ramenées aux lois de la chimie. Il est évident, d'après ce que nous venons de voir, que l'expression est absolument impropre. On peut dire qu'on a ramené le phénomène de la vision aux lois de la physique si l'on a montré que l'œil fonctionne simplement comme un objectif photographique, ou une lentille : cela revient à dire que, dans l'organisme comme au laboratoire, la relation

$$\sin i = n \sin r$$

est toujours vérifiée. Mais, en chimie, il n'y a rien de pareil.

S'agit-il de la loi de la conservation de la masse, ou des lois de proportions? Les traités les plus anciens de chimie ne marquent aucune préoccupation à leur sujet. Il ne semble pas qu'on se soit jamais[1] demandé si le fait, pour un composé quelconque, d'avoir été extrait d'un être vivant, le dispensait d'avoir un poids égal à la somme des poids de ses éléments, ou si ceux-ci pouvaient y avoir un poids atomique différent de celui qu'ils ont dans les composés minéraux, ou

1. Depuis que la chimie est constituée en science. D'après Ostwald (*L'Energie*, p. 38). Newton aurait tenu à vérifier que la durée d'oscillation d'un pendule était la même, que ce pendule fût formé d'une matière inerte ou d'un corps ayant vécu. Il s'agit ici d'une époque antérieure à la découverte des premières lois chimiques

encore s'il fallait des méthodes spéciales pour les déterminer : la réponse à toutes ces questions ne pouvait être que négative, dès l'époque à laquelle ces lois ont été découvertes. S'agit-il, au contraire, des lois de réaction, des lois d'affinité : a-t-on établi que ces lois s'appliquent aussi bien aux réactions qui se produisent dans les cellules qu'à celles que nous réalisons dans les laboratoires ? Il faudrait, pour le faire d'une façon générale, que ces lois fussent connues, et nous venons de voir qu'elles ne le sont pas.

Dans quelques cas particuliers, on a pu voir se produire dans la nature vivante un phénomène qui, dans les mêmes conditions, se serait aussi produit dans un tube de verre ; par exemple l'oxalate de chaux, qui se forme *in vitro* aussitôt que l'acide oxalique rencontre la chaux, se forme de même *in vivo*. Mais les cas où ces *mêmes conditions* peuvent être réalisées sont tellement rares, que ces concordances n'ont pu être observées que très exceptionnellement, et se fonder sur elles pour dire qu'on a expliqué le mystère de la vie est employer de bien grands mots pour une bien petite chose.

Nous allons passer en revue (très incomplètement d'ailleurs, et à bâtons rompus), dans les chapitres qui vont suivre, quelques-unes des fonctions des êtres vivants et les envisager au point de vue de la chimie. Il serait puéril de nier que la tendance de la science moderne, et même de la science depuis qu'elle existe, est de les expliquer par les *mêmes* réactions que celles dont nous sommes les maîtres : et c'est dans cet esprit

que tout ce qui suit a été écrit. Mais la chimie est si peu avancée dans cette direction, que nous ne pourrons jamais constater l'*identité* entre une réaction vitale et une réaction inorganique et que nous devrons nous contenter d'*analogies*. Quand, au moyen de produits que nous aurons préparés nous mêmes, nous aurons réussi à imiter une des transformations chimiques constatées dans des cellules, nous admettrons que la même explication s'applique aux deux cas, et que le phénomène naturel est ramené à son modèle artificiel. C'est, je pense, ce qu'ont voulu dire ceux qui ont prétendu que la nature organique avait été ramenée aux lois de la nature inorganique; ils ont pris pour des identités de simples analogies, et leur expression est d'autant plus exagérée que, dans la plupart des cas où nous imitons la nature, le phénomène que nous savons provoquer à notre guise est encore aujourd'hui pour nous aussi obscur que le phénomène vital lui-même.

Nous avons donc simplement ramené, le plus souvent, l'incompréhensibe à l'incompris. C'est à la fois beaucoup et peu : beaucoup, parce que nous sommes assez avancés pour ne plus rien voir de mystérieux dans notre fonctionnement chimique et parce que cet incompris s'éclaire petit à petit; peu, parce que ces analogies, en l'absence de toute loi qui permette de leur donner une forme précise, restent vagues et finalement ne prouvent rien. Il faudrait s'excuser, avant de commencer, d'aborder un sujet sur lequel il n'y a, scientifiquement parlant, rien à dire.

CHAPITRE II

LA SYNTHÈSE CHIMIQUE

Les produits sur lesquels opèrent les chimistes se divisent en deux classes : les produits naturels, tels que les minéraux ou les composés formés dans les organes des végétaux et des animaux; et les produits artificiels ou synthétiques, que nous composons soit au moyen de leurs éléments chimiques, soit aux dépens d'une autre substance d'origine quelconque. Ces derniers sont, actuellement, de beaucoup les plus nombreux : mais il n'en a pas toujours été ainsi, et les débuts de la chimie ont été consacrés uniquement à l'étude des corps naturels, et principalement de ceux de la nature minérale, dont la composition est beaucoup plus simple, et qui donnent en réagissant les uns sur les autres des produits plus faciles à séparer et à identifier.

Parmi ces produits, un certain nombre ont été particulièrement retenus comme étant des *réactifs*, c'est-à-dire des corps à affinités énergiques, capables de réagir sur presque tous les autres, en leur faisant subir de profondes transformations : ce sont en général des acides, acide sulfurique, nitrique ou chlorhydrique, ou des bases fortes

telles que la potasse et la soude, qui ont encore aujourd'hui leur place marquée dans la *boîte à réactifs* dont le chimiste ne saurait se passer, et dont la composition n'a pas beaucoup varié depuis l'âge de pierre de l'alchimie. Pendant tout le temps où, nulle théorie ne guidant les recherches, le plus sur était de s'en remettre au hasard [1], l'étude d'un corps nouveau consistait presque uniquement à le mettre en présence de ces réactifs, ou à le chauffer avec eux, et à examiner ce qui se passait. C'est ainsi qu'ont été obtenus les premiers résultats dans l'étude des corps organiques, retirés des êtres vivants. Après les avoir, avec plus ou moins de succès, traités par la chaleur, par les acides ou par les bases, les chimistes n'ont pas tardé à reconnaître que les corps plus simples auxquels ils aboutissaient quelquefois n'étaient pas identiques à ceux de la chimie minérale. A de rares exceptions près, ils étaient de nature et de propriétés différentes, et nous verrons ces différences exprimées de façon curieuse par Macquer. Il y avait donc lieu de diviser la chimie en chimie minérale et chimie organique : cette division était générale dès les premières années du XIX^e^ siècle.

Aux arguments d'ordre chimique venaient s'ajouter, pour donner plus d'importance à cette

1. L'une des découvertes les plus inattendues des alchimistes a été celle du phosphore, ce corps extraordinaire qui luit dans l'obscurité et s'enflamme spontanément à l'air : cette découverte (1669) est entièrement due au hasard : en effet, Brandt a retiré le phosphore de l'urine, où il n'existe qu'en quantité excessivement faible (moins de 1 1.000), tandis qu'il était beaucoup plus facile de le retirer des os, qui en contiennent plus de 10 p. 100.

division, des raisons d'ordre philosophique. Les produits organiques, à l'exclusion des autres, étaient des produits de la vie, c'est-à-dire de quelque chose d'incompréhensible et même d'indéfinissable. On pouvait se demander, non seulement si les corps organiques étaient différents en substance des corps minéraux, et *tels qu'il n'y eût jamais identité entre un composé, extrait d'une matière ayant vécu, et un composé préparé au moyen de corps purement minéraux*, mais aussi si leurs réactions et leurs transformations n'étaient pas d'une nature différente, due à leur origine vitale, et *telles qu'il fût impossible de reproduire ces transformations en dehors d'un organisme vivant.* On comprend sans peine que des opinions assez opposées aient été émises à ce sujet à diverses époques par des chimistes différents. Actuellement, un vote quasi-unanime a effacé la distinction entre les deux chimies : on ne la maintient que comme une classification commode, mais nous serons amenés à reconnaître que cette conclusion repose, somme toute, sur une base expérimentale assez fragile, en ce qui concerne du moins la seconde question. S'il est démontré qu'un nombre immense de composés produits artificiellement sont identiques à des produits naturels, extraits de matières vivantes, il s'en faut de beaucoup que toutes les réactions que nous voyons s'accomplir dans les organismes puissent être imitées par nous dans nos ustensiles de laboratoire.

Il y a avantage à poser ces deux questions séparément, parce que souvent l'on a vu un chimiste

répondre *oui* à la première — identité des corps — et *non* à la seconde — identité des réactions. — Il n'y a rien d'illogique dans cette double réponse, et elle éclaire parfaitement au contraire l'état d'esprit de son auteur : mais il arrive aussi que celui-ci ne s'est pas donné la peine d'envisager séparément les deux faces du problème, qu'il réponde oui à une page et non à la page suivante. Est-ce pour cela que l'histoire, sur ce point particulier, a cédé la place à la légende ? Toujours est-il qu'elle m'a semblé fort inexactement comprise, par presque tous ceux qui s'en sont occupés [1], et ceci m'a engagé à l'écrire une fois de plus. Ce que nous y apprendrons ne sera pas inutile, et permettra de préciser et de mieux comprendre quelques faits ou quelques idées que nous aurons l'occasion de retrouver plus tard.

J'indiquerai en passant, avec les références nécessaires, les points sur lesquels il me semble que la doctrine courante a le plus besoin d'être corrigée.

Un chimiste alors très connu, quoique son nom ne rappelle aucune grande découverte, Macquer, écrit en 1789 (*Dictionnaire de Chimie*, article Règnes) :

« La plupart des physiciens, des naturalistes

1. Berthelot. *Méthodes de synthèse*, p. 14. — Painlevé. *Revue du mois*, t. III, p. 513, et t. V, p. 513. — Marais et Bauer. *Pages libres*, 8 juin 1907. — Jagnaux. *Histoire de la chimie*, t. II, p. 471. — A. Gautier. *Revue scientifique*. 1907, p. 385. — Aristide Briand. Discours prononcé au Panthéon le 25 mars 1907. — C. Matignon. *Revue générale des sciences*. 1907. p. 349.

et des chimistes divisent tous les corps naturels en trois grandes classes : savoir, celle des minéraux, celle des végétaux et celle des animaux.....

« Mais, malgré des caractères aussi distinctifs, il y a des philosophes qui prétendent que ces classes ne sont qu'idéales et n'ont rien de réel : ils assurent... qu'on peut descendre depuis l'animal le plus parfait jusqu'au minéral le plus brut, par degrés insensibles et sans trouver aucun interstice auquel on puisse s'arrêter pour faire une division.

« Cette idée est sans doute grande, sublime, et n'est point sans vraisemblance... mais la discussion de cette matière est étrangère à notre objet ; c'est pourquoi nous n'entrerons pas dans de plus grands détails sur cela, nous ne considérerons ces choses que chimiquement... Or, voici ce que l'expérience nous a fait connaître à ce sujet. Dans les décompositions de tous les êtres véritablement vivants, organisés, et qui portent en eux une cause de reproduction, tels que sont les végétaux et les animaux, on retire constamment une substance inflammable, grasse, ou huileuse : et au contraire on ne trouve pas le moindre vestige de ce principe dans aucune des substances purement minérales ».

Ce *principe huileux* est caractéristique de l'action vitale :

« Cette huile des végétaux, qui devient celle des animaux..., est donc essentiellement le produit de la végétation, et le règne végétal entier est le grand atelier dans lequel la nature fait les premières combinaisons de la matière du feu,

probablement par le moyen de leur action organique vitale, et par un mécanisme qui nous est entièrement inconnu[1]. »

Il ne faut pas mépriser ces textes antiques, mais se rappeler qu'ils datent d'une époque à laquelle on n'avait nulle idée que les corps fussent formés d'*éléments* au sens où nous entendons ce mot : en 1789, bien des chimistes unissaient la *terre* au *principe du feu* et servaient le tout assaisonné de la dose convenable de phlogistique, pour expliquer indifféremment une chose et la chose contraire[2]. L'idée exprimée par Macquer n'est pas aussi absurde qu'elle le semble, car il ne pouvait pas savoir que le fait de la production d'une huile dans la calcination des matières organisées résultait simplement de la présence du carbone dans ces matières (effectivement, la plupart des composés du carbone dégagent, à la calcination, une substance inflammable, ou grasse, ou huileuse), et ainsi il se trouvait définir, sans s'en douter, la chimie organique comme celle des composés du carbone : définition encore en usage aujourd'hui. Tout en reconnaissant que l'idée de la continuité interrompue du minéral à l'animal avait déjà des partisans de son temps (ce qui est pour nous le point important), il juge que cette idée n'a point de fondement dans les faits, et refuse au chimiste le pouvoir de créer, sans le secours de la force vitale, cette *huile* caractéristique,

1. Dictionnaire de chimie, art. *Phlogistique*.

2. La chimie d'alors ressemblait étrangement à l'économie politique d'aujourd'hui.

c'est-à-dire, dans le langage moderne, tout composé un peu complexe du carbone. Macquer est donc de ceux qui nient la possibilité de la synthèse. Mais ses arguments sont assez faibles, et ne pouvaient guère résister à la découverte des véritables éléments, découverte qui donnait l'explication des faits constatés par lui et ramenaient le *principe huileux* à sa juste valeur. Aussi, les raisons invoquées après lui par les partisans de la force vitale ont-elles été d'une tout autre nature.

Leur opinion était, il ne faut pas l'oublier, beaucoup plus facile à soutenir que l'opinion contraire. Les faits paraissaient leur donner raison, puisqu'ils constataient (sans pouvoir en connaître le peu d'importance) des différences réelles entre les composés minéraux et les composés organiques, tandis que leurs adversaires, partisans de la continuité du minéral à l'animal, ne pouvaient expliquer que d'une façon extrêmement vague les phénomènes de la vie avec les seules ressources de la chimie d'alors. En fait, ils avaient nécessairement tort ; Fourcroy écrit en 1806[1] :

« Il n'y a que le tissu des végétaux vivants, il n'y a que leurs organes végétants, qui puissent former les matières qu'on en extrait, et aucun instrument de l'art ne peut imiter les compositions qui se font dans les machines organisées des plantes ».

1. *Philosophie chimique*, p. 303.

Mais il n'affirme pas qu'il en sera toujours ainsi, et, au contraire, pour lui, « les végétaux sont de véritables instruments chimiques, dont les fonctions ne peuvent être connues que par les lois de la chimie [1] », déclaration qui nous semble aujourd'hui modeste, mais qui était d'une folle témérité en 1806 ; car, pour ramener les fonctions des végétaux aux lois de la chimie, Fourcroy devait oublier momentanément qu'il ne savait absolument rien sur les premières, et fort peu de choses sur les secondes.

Plus audacieux encore était le célèbre Berthollet, qui avait écrit trois années auparavant :

« Les produits de la végétation sont composés des mêmes substances dont nous avons observé l'action chimique... Leur formation et les changements spontanés qu'ils subissent ne supposent ni d'autres affinités ni d'autres principes d'action que ceux qui produisent les effets chimiques... On peut former des substances d'une nature végétale, telles que l'acide oxalique, l'acide malique, l'acide acétique, qui sont absolument semblables aux productions naturelles ; c'est que l'on n'emploie pas, dans un laboratoire, des moyens différents de ceux de la nature ; on réunit seulement les circonstances qui favorisent l'exercice des propriétés qui sont départies à chaque substance : la nature ne tient sa puissance que de ces propriétés éternelles : les vues particulières qu'on lui prête, les moyens qu'on lui suppose, ne font qu'éloigner l'observa-

1. *Philosophie chimique*, p. 77.

tion des véritables causes auxquelles on en substitue d'idéales[1]... »

Berthollet parle, comme on le voit, en homme convaincu, ce qui s'explique peut-être par le très petit nombre de faits qu'il aurait pu citer à l'appui de ses théories ; on sait que les convictions les plus fortes sont celles qui ne reposent sur aucune preuve. Il faut lui reconnaître ce mérite, qu'il cherche à mettre ses doctrines en pratique, au lieu de se tenir à des hauteurs inaccessibles : par exemple, il essaie d'expliquer les phénomènes de l'assimilation par des réactions chimiques semblables ou identiques à celles que l'on produit au laboratoire ; et, si ces explications sont quelque peu insuffisantes, on l'en excusera si l'on pense que, à l'époque où il écrivait, on croyait que l'azote était un élément constitutif de l'acide acétique; qu'on appelait encore le chlore l'acide muriatique oxygéné, et que Fourcroy, qui n'était pas le moindre chimiste de son temps, considérait encore comme vraisemblable que la potasse fût formée de chaux et d'azote[2] !

Sautons maintenant une trentaine d'années, pendant lesquelles la chimie fait des progrès immenses, s'organise et devient autre chose qu'un recueil de formules. Le traité de chimie de Dumas, publié en 1835, comparé au diction-

1. *Statique chimique*, t. II, p. 482, 1803. Il n'est pas du tout exact, comme on le voit, que tous les chimistes avant 1850 aient cru nécessaire une *force vitale* différente des forces chimiques.

2. *Philosophie chimique*, p. 225.

naire de Macquer (1789), donne la mesure de cette évolution et permet de comparer à la chimie moderne l'alchimie du moyen âge. Nous y retrouvons la doctrine de Berthollet :

« Les chimistes qui soutiennent que les substances organiques ont quelque chose de spécifique dans leur arrangement moléculaire, me semblent tout aussi fondés dans leur opinion que les minéralogistes qui veulent, ou qui voulaient voir dans les minéraux autre chose que des espèces chimiques ordinaires. M. Berzélius, qui eut si longtemps à combattre ces opinions, et qui en a si habilement triomphé en ce qui concerne les espèces minéralogiques, s'est lui-même laissé préoccuper à l'égard de la chimie organique, ce me semble, précisément par le système d'idées qu'il a déjà renversé dans ce cas particulier[1]. »

« Votre curiosité sera même singulièrement excitée, quand nous chercherons ensemble à approfondir tous ces beaux phénomènes qui se passent dans les corps de la nature organique, et que vous verrez la chimie luttant courageusement avec la nature vivante, l'égaler si souvent et la dépasser parfois. Vous penserez alors que, si la chimie succombe en tant d'occasions, que si elle échoue quand elle veut analyser et surtout reproduire tant de corps organiques, vous penserez, dis-je, qu'il faut moins s'en prendre à ses méthodes qu'à notre inexpérience actuelle[2]. »

1. *Traité de chimie appliquée aux arts*, t. V, p. 79, 1835.

2. *Philosophie chimique*, p. 465 de l'édition de 1878. Les leçons de Dumas ont été professées en 1836 au Collège de France et publiées peu de temps après. M. A. Bianconi a bien voulu vérifier

C'est répondre assez nettement à la double question posée au début de ce chapitre ; aucune force particulière à la vie ne se montre ni dans la nature, ni dans la transformation des corps organiques.

A peu près à la même époque, nous trouvons un son de cloche différent (au moins en apparence) dans les écrits du célèbre Liebig, à la fois chimiste et philosophe. Liebig est partisan de la *force vitale*, et le mot revient souvent sous sa plume. Il cherche à définir en quoi elle diffère des forces chimiques ordinaires.

« La faculté des corps élémentaires de former les combinaisons particulières qui se produisent par la végétation ou par la vie animale n'est autre chose que *l'affinité chimique* : mais la cause qui les empêche de s'unir et de céder aux attractions qui dans d'autres conditions les portent les uns vers les autres, la cause donc qui les dispose dans l'être vivant et leur assigne une forme spéciale, c'est la *force vitale*[1]. »

J'avoue qu'il m'est impossible de comprendre d'après ce texte ce que Liebig entend au juste par la *force vitale*. S'il avait cité un cas où les corps élémentaires *ne cèdent pas* aux attractions qui, *dans d'autres conditions*, les portent les uns vers les autres, nous serions grandement éclairés : mais, comme il a négligé de le faire, nous ne savons pas au juste ce qu'il veut dire. Mainte-

à la Bibliothèque nationale la conformité de la deuxième édition avec celle de 1836.

1. *Traité de chimie organique*, Paris, 1840. Introduction, p. CXCV.

nant, ce qui nous importe, ce n'est pas son opinion sur ce point : c'est la réponse qu'il aurait faite à nos deux questions. Or, ceux qui croient qu'un partisan de la force vitale devait nécessairement conclure à l'impossibilité de la synthèse, ou à l'impossibilité de pénétrer le mécanisme des transformations organiques, me paraissent se tromper du tout au tout. En effet, si les termes de Liebig sont vagues et ambigus, il n'en est pas de même de ceux qu'emploie Berzélius, lui aussi enclin à invoquer cette force vitale :

« Dans la nature vivante, les éléments paraissent obéir à des lois tout autres que dans la nature inorganique : les produits qui résultent de l'action réciproque de ces éléments diffèrent donc de ceux que nous présente la nature inorganique [1]. »

« L'individu qui meurt et qui rend ses éléments à la nature inorganique, ne revient jamais (au lieu que ses éléments sont indestructibles). Il s'ensuit que l'essence des corps vivants ne repose pas sur ses éléments inorganiques mais sur quelque autre principe, qui porte les éléments inorganiques communs à tous les êtres vivants à coopérer à la production d'un résultat particulier, déterminé et différent pour chaque espèce. Ce principe (que nous désignons sous le nom de *force vitale* ou *assimilatrice*... [2]). »

1. *Traité de chimie*. t. V, p. 1. 1849. La date est celle de la traduction française : la date réelle est bien antérieure, car Berzélius est mort le 1er août 1848. Ce texte a été cité très souvent : il me semble avoir un sens très différent de celui qui lui a été attribué.

2. *Ibid.*, p. 2.

La similitude des idées et des termes nous autorise à considérer comme très voisines les idées de Liebig et de Berzélius sur cette force vitale : ainsi, le second va nous expliquer le premier : « Si, dans les phénomènes de la chimie organique, on entend par la force vitale autre chose qu'un concours particulier de circonstances différentes mettant en jeu les forces naturelles de la nature organique : enfin, si l'on entend par là une force chimique particulière, inhérente à la nature vivante, on commet une erreur » (page 6).

« On parvient quelquefois, par un effet de l'art, à combiner les éléments inertes, pour former des composés identiques à ceux qui sont produits par l'action vitale, pourvu qu'on réussisse à les placer dans des conditions propres à faciliter le jeu nécessaire des éléments communs » (page 5).

« L'électricité, la lumière, la chaleur et les réactifs chimiques, inégalement répartis, telles sont les conditions qui déterminent les éléments à donner naissance à des combinaisons organiques si variées : l'art cherche à imiter l'action vitale en se servant de ces conditions, bien que leur concours ne soit pas ici aussi parfait que dans la nature vivante » (page 6).

La force vitale, en tant que force chimique, n'existe pas : c'est un simple concours de circonstances ; ces circonstances, nous savons quelquefois les réaliser artificiellement : — comment a-t-on[1] pu dire que Berzélius croyait la synthèse chi-

1. Jagnaux, Painlevé, Marais et Bauer.

mique impossible ? Il n'en est évidemment rien. Et même, peut-on dire que les transformations à l'intérieur des organismes soient, pour lui, en dehors du domaine de la chimie ? Il y a une étrange contradiction entre ces trois derniers textes, qui donnent comme conditions de la production des corps organiques : l'électricité, la lumière, la chaleur, les réactifs chimiques *et pas du tout la force vitale*, et le premier d'après lequel *dans la nature vivante, les éléments paraissent obéir à des lois tout autres que dans la nature inorganique* (c'est-à-dire sous l'influence de la lumière, de la chaleur. de l'électricité et des réactifs chimiques). Et je crois que la manière la plus simple d'expliquer cette contradiction est d'invoquer le combat qui devait se livrer, dans l'esprit de Berzélius, entre le chimiste et le croyant.

Le chimiste nous est assez connu ; le croyant, nous le pressentons par cette phrase de Dumas qui nous le représente comme s'étant *laissé préoccuper par un système d'idées*. Mais il a pris soin de se présenter lui-même :

« Tout ce qui tient à la nature organique annonce un but sage et se manifeste comme le produit d'un entendement supérieur: et l'homme... a été conduit à regarder sa faculté de penser et de calculer, comme une image de cet être à qui il doit son existence » (*loc. cit.*, p. 3).

« Tout homme habitué à réfléchir sur ces questions doit être convaincu de l'impossibilité de les résoudre et, sur l'origine mystérieuse de la vie, il s'en tiendra aux premiers versets de la Genèse » (*ibid.*, p. 9).

Rappelons nous que Berzélius, né en 1779, avait à sa mort près de soixante-dix ans ; il était, à cet âge, cruellement pris entre sa logique et sa foi [1]. Sa foi lui interdisait de croire qu'il n'y eût, dans les êtres vivants, que de la chimie : il devait y avoir quelque chose de divin, la force vitale. Mais aussitôt celle-ci admise, sa raison de chimiste l'obligeait à la nier en la réduisant, en fait, à rien. De même de nos jours un géologue, tout en admettant qu'un tremblement de terre ait été envoyé par Dieu pour détruire une ville impie, ne refusera pas à la Science le pouvoir d'expliquer et même, au besoin, de prévoir ou de provoquer les tremblements de terre. C'est un état d'âme singulier et qui peut être difficile à comprendre, mais dont nous retrouverons en Pasteur un nouvel exemple quand il s'agira de la fermentation alcoolique.

Nous pouvons nous arrêter à Berzélius : nous sommes en 1850, et il semble qu'à cette époque les chimistes aient été unanimes à revendiquer pour leur science le droit d'expliquer tous les phénomènes vitaux et d'en reproduire tous les stades. Wurtz écrit en 1850 [2] :

« Quoi qu'on ait pu dire, découvrir cette constitution (*des composés organiques*), ce sera toujours un des problèmes les plus importants à résoudre, ce sera toujours le premier pas dans cette voie

1. Liebig aussi était croyant et éprouvait le besoin de le dire. (*Chimie organique*, p. 235, Paris, 1842.) — M. Painlevé écrit (*Loc. cit.*, p. 513) : *Je ne pense pas pourtant que Berzélius s'inquiétât d'accorder la chimie et la Bible.* — Je n'en suis pas du tout sûr !

2. *Annales de chimie et de physique*, t. XXX, p. 445.

féconde dans laquelle la Science tend à entrer de plus en plus et qui a pour but la formation artificielle des composés organiques. »

Et Gerhardt, après avoir dans une première édition de son livre reproduit presque textuellement les idées et même les phrases de son maître Liebig, commence ainsi la deuxième :

« La chimie organique s'occupe de l'étude des lois d'après lesquelles se métamorphosent les matières qui constituent les plantes et les animaux : elle a pour but la connaissance des moyens propres à composer les substances organiques en dehors de l'économie vivante[1]. »

La chimie embrasse désormais, sans restriction, tous les phénomènes et tous les produits de la vie.

De cette revue rapide je crois pouvoir conclure à l'erreur de l'opinion très répandue, d'après laquelle les anciens chimistes auraient conclu à l'impossibilité de la synthèse organique, d'après laquelle aussi ce seraient les travaux de Berthelot (dont les premiers sont de 1850), qui les auraient détrompés en leur montrant la voie véritable. Les textes, et même ceux que l'on cite à l'appui de cette manière de voir, ne montrent rien de pareil aussitôt qu'on se donne la peine de les éclairer par d'autres et d'en approfondir le sens.

D'ailleurs, il n'est pas difficile d'en trouver une

1. M. Painlevé (*Revue du mois, loc. cit.*, p. 515) pense que ce revirement des opinions de Gerhardt a eu pour cause les premiers travaux de Berthelot. Je ne pense pas qu'il en soit ainsi (t. VI, p. 103), ni même qu'il y ait eu revirement véritable.

autre preuve. Une doctrine d'après laquelle la synthèse chimique aurait été impossible devait nécessairement disparaître au premier jour où une de ces synthèses serait réalisée. Or (et ici encore en dépit de l'opinion courante, d'après laquelle les premières de ces synthèses auraient eu Berthelot comme auteur [1]) déjà, en 1850, les chimistes savaient reproduire un nombre considérable de substances organiques.

La plupart des synthèses, il est vrai, n'étaient que des transformations de ces substances les unes dans les autres. On savait depuis très longtemps, par exemple, que beaucoup de substances végétales ou animales (amidon, sucre, gélatine), soumises à l'action de l'acide nitrique, donnaient de l'acide oxalique identiqne à celui qui existait naturellement dans les feuilles d'oseille, De telles expériences montraient bien que l'on pouvait, en dehors des organismes, réaliser beaucoup de transformations observées d'abord dans ces organismes : mais elles ne prouvaient pas que l'on pût créer de toutes pièces, c'est-à-dire en partant des éléments, ces mêmes combinaisons. Il fallait pour cela des synthèses totales, effectuées à partir de composés sûrement minéraux. Le hasard a, dès l'origine de la chimie, conduit à faire un certain nombre de ces synthèses.

1. A part celle de l'urée, citée partout comme un fait isolé, « c'est à Berthelot que revient la gloire d'avoir démontré par des expériences décisives l'identité des lois qui régissent la formation des substances minérales et des substances organiques » (Jagnaux). — « On ne savait pas, en partant des éléments, reproduire les corps de la chimie organique » (Marais et Bauer), etc...

Le sulfure de carbone CS^2 se produit par la combinaison directe du soufre et du carbone. En 1843, Kolbe fait réagir le chlore sur le sulfure de carbone et obtient le tétrachlorure de carbone CCl^4. En 1845, Melsens réduit ce tétrachlorure par l'amalgame de potassium et obtient le *méthane*, ou gaz des marais[1], CH^4, premier hydrocarbure saturé, produit ainsi par synthèse totale.

L'action du chlore sur le sulfure de carbone donne à Kolbe en 1845 un nouveau chlorure de carbone, le bichlorure C^2Cl^4, qu'il transforme par l'action du chlore et de l'eau en acide trichloracétique. Or, en 1844, Melsens avait réduit, par l'amalgame de potassium, cet acide en *acide acétique* ordinaire.

Celui-ci était lui-même le produit initial de nouvelles synthèses. L'électrolyse de l'acétate de potassium fournissait, en effet, à Kolbe, en 1849 l'*éthane* C^2H^6, second terme de la série des hydrocarbures saturés. La calcination de l'acétate de chaux donnait l'*acétone* : en 1832 Liebig montrait que le chlorure de chaux transformait celle-ci en *chloroforme* ; et deux années plus tard Dumas, traitant le chloroforme par la potasse, obtenait l'*acide formique*.

Kuhlmann, en 1838, réduit l'acide acétique par l'hydrogène en présence de la mousse de platine et obtient de l'éther acétique, dont un

1. La lecture de la note de Melsens aux *Comptes rendus* montre qu'il était très préoccupé d'idées de synthèse. Il annonça dans cette voie des expériences très intéressantes (synthèse de l'éthylène) qui n'ont pas paru et peut-être n'ont pas réussi.

alcali isole l'*alcool éthylique* ou alcool ordinaire.

La calcination de l'acétate de potassium avec l'acide arsénieux donne des produits d'où Bunsen, par l'action de réactifs purement minéraux, acide chlorhydrique et zinc, retire en 1842 le cacodyle : la chaleur décompose celui-ci en arsenic et en un mélange gazeux contenant la moitié de son volume *d'éthylène* C^2H^4, premier terme de la série des hydrocarbures à double liaison.

Faraday avait montré que l'éthylène était absorbé par l'acide sulfurique : d'un échantillon du liquide ainsi obtenu Hennell, en 1827, retire l'acide sulfovinique. Or Dumas indique dans son traité de chimie de 1835, que l'acide sulfovinique décomposé par l'eau bouillante donne de l'alcool. C'est une nouvelle synthèse, aussitôt oubliée d'ailleurs et à laquelle Hennell ne fait même pas attention.

Liebig, en 1834, prépare l'oxalate de potassium par l'action du potassium sur l'oxyde de carbone : ceci entraîne la synthèse de l'*acide oxalique*, et un deuxième mode de production de l'acide formique qui se trouve dans les produits de distillation du premier. L'oxalate d'ammoniaque chauffé se déshydrate et donne l'oxamide : celle-ci, passant dans un tube chauffé au rouge, donne à Liebig l'*urée* en 1834.

La synthèse de l'urée est possible de bien d'autres manières : Wöhler l'obtient à partir du cyanate de potassium et on sait déjà, à cette époque (bien que le procédé ne soit jamais suivi) faire la synthèse de l'acide cyanique en passant succes-

sivement par le cyanogène, le chlorure de cyanogène et l'acide cyanurique. Mais un procédé beaucoup plus direct est donné par Liebig en 1841 : l'acide cyanhydrique (produit, à l'état de cyanure d'ammonium par Langlois en 1841, en faisant passer du gaz ammoniac[1] sur des charbons rouges ; ou, plus simplement, par la calcination du formiate d'ammoniaque) est facilement transformé en ferrocyanure de potassium par l'action de la potasse et du sulfate de fer : ce ferrocyanure, chauffé avec du bioxyde de manganèse, donne finalement de l'urée identique au produit naturel.

Ainsi nous voyons que, avant 1850, les chimistes avaient réussi déjà la synthèse des premiers composés de plusieurs séries :

Série des carbures saturés avec le méthane et l'éthane.

Série des carbures non saturés avec l'éthylène[2].

Séries des alcools avec l'alcool ordinaire : séries accessoires avec l'aldéhyde et l'acétone.

Série des acides monobasiques avec les acides formique et acétique.

Série des acides bibasiques avec l'acide oxalique.

1. L'ammoniaque est elle-même un produit de synthèse : Cavendish, en 1785, combine, par l'étincelle électrique, l'azote et l'oxygène ; Kuhlmann, en 1838, réduit par l'hydrogène les composés oxygénés de l'azote en gaz ammoniac.

2. On pourrait y joindre le mésitylène ou triméthylbenzène (série aromatique), produit par l'action de l'acide sulfurique sur l'acétone, et les carbures mal identifiés que donne la fonte en se dissolvant dans les acides.

Composés azotés avec l'acide cyanhydrique[1], l'urée, l'acide cyanurique[2].

A cette liste il faudrait encore joindre l'acétylène, découvert par Edmond Davy en 1837 par l'action de l'eau sur les résidus de préparation du potassium, mais qui n'avait pas été isolé à l'état pur. Même sans en tenir compte, nous voyons qu'en 1850 le travail de synthèse était en bonne voie, alors que la chimie organique était vieille de trente ans seulement. Ce travail ne devait plus s'arrêter depuis. En 1851 Berthelot, faisant passer de la vapeur d'alcool ou d'acide acétique dans un tube chauffé au rouge, isole dans les produits de la décomposition la benzine, la naphtaline, le phénol, ainsi produits par synthèse totale. En 1857 il démontre l'identité du chlorure de méthyle, produit par l'action de l'acide chlorhydrique sur l'alcool méthylique, et du méthane monochloré produit à partir du méthane : l'action de la potasse sur ce chlorure lui permet de réaliser la synthèse de l'alcool méthylique. En 1862 il produit l'acétylène par la combinaison directe du carbone et de l'hydrogène. A cette époque les chercheurs sont si nombreux que les synthèses, de plus en plus difficiles cependant, se multiplient de toutes parts. En voici quelques-unes, choisies parmi les plus intéressantes.

L'acétone, réduite par l'amalgame de sodium, donne l'alcool isopropylique que Friedel et Silva transforment en *glycérine* (1873) : celle-ci sert

1. Produit naturel, découvert dans l'eau distillée de laurier-cerise.

2. Découvert dans les produits de calcination de l'acide urique, produit naturel.

elle-même de point de départ à Grimaux et Adam pour la synthèse de l'*acide citrique* (1881).

La benzine avait été produite par Berthelot, soit par l'action de la chaleur rouge sur l'alcool, soit par la condensation de l'acétylène ; beaucoup de ses dérivés, obtenus synthétiquement, sont identiques à des composés naturels, tels que l'*acide benzoïque* du benjoin (Harnitz-Harnitzki, 1864 ; Kékulé, 1866) ou l'aldéhyde benzoïque (ou *essence d'amandes amères* : Lauth et Grimaux, 1866). Un dérivé un peu plus complexe est la *vanilline*, principe odorant de la vanille (Tiemann, 1876).

La polymérisation de la benzine et d'autres carbures homologues, sous l'action d'une haute température, conduit à l'anthracène, matière première de la synthèse de l'*alizarine* ou matière colorante de la garance (Graebe et Liebermann 1868) ; l'alizarine est un des premiers produits de synthèse industrielle qui soient venus faire concurrence au produit naturel et l'aient finalement fait disparaître. Un autre est l'*indigotine*, identique à la matière colorante de l'indigo des Indes, dont la synthèse, à partir de la naphtaline et du toluène, a été effectuée par Baeyer (1879) et par Drewsen (1882).

Un autre groupe très important de synthèses est dû à Emile Fischer, et occupe plusieurs années jusqu'en 1900 environ : il comprend les principales matières sucrées (*glucose*, *lévulose*, *mannite*, etc.), produites à partir de l'aldéhyde formique ou de la glycérine suivant les réactions de Boutlerow et de Loew. Le même chimiste a

encore réalisé la synthèse de l'*acide urique* et de deux de ses dérivés, la *caféine* et la *théobromine* découvertes dans le thé, le café et le cacao (1897-1899) ; une autre synthèse de l'acide urique avait déjà été indiquée par Behrend et Roosen en 1889.

La constitution des alcaloïdes naturels a été aussi éclairée par la synthèse. Ici la tâche s'est montrée beaucoup plus difficile, et les succès se comptent. On peut cependant citer l'*atropine* de la belladone, l'*hyoscyamine* de la jusquiame (Willstätter, Ladenburg, 1901-1902), la *laudanosine* de l'opium (Amé Pictet, 1908).

Enfin il faut citer une synthèse extrêmement importante au point de vue industriel, celle du *camphre* qui, après avoir occupé les chercheurs pendant de longues années, n'a pu être réalisée que tout dernièrement[1].

Assurément il reste beaucoup de synthèses à réaliser. On peut même dire qu'il y en aura toujours, car la découverte de substances nouvelles dans les produits naturels va plus vite que la synthèse des substances déjà connues. La plupart de ces synthèses sont extrêmement difficiles, pour des raisons qui sont trop du domaine de la chimie organique pure pour qu'il soit utile de les indiquer ici. Il n'est donc pas surprenant qu'elles ne soient pas toutes faites : mais on peut considérer comme expérimentalement démontré qu'elles sont toutes possibles.

Il faut, cependant, bien s'entendre, car le mot

1. Les travaux relatifs à la synthèse du camphre ont été décrits par M. L. J. Simon (Revue du mois, t. IV, p. 560) avec toutes les conséquences qui découlent de cette synthèse.

substance peut prêter à une équivoque, pouvant aussi bien désigner un mélange qu'un corps unique. Les anciens chimistes, ceux du XVIII^e siècle, étudiaient encore le sang ou le lait comme ils auraient étudié le sel marin ou tout autre composé défini : c'est ainsi que le carbonate d'ammoniaque portait le nom d'*esprit de corne de cerf*, parce qu'on pouvait l'obtenir en calcinant cette corne, opération qui nous semble aujourd'hui un peu trop pharmaceutique. Or le sang, comme le lait, est un mélange complexe : toute réaction effectuée sur lui a donc bien des chances d'aboutir à un mélange encore plus complexe dont on ne pourra rien tirer que les *esprits* ou les *huiles* de Macquer. Les premiers progrès de la chimie ont été dus à des procédés de séparation permettant d'isoler et de caractériser des substances pures (solubilités, volatilités, etc.), et déjà Dumas, en 1835, se préoccupe sagement de limiter à ces substances pures l'objet de la chimie.

« On entend par substances organiques, les matières chimiques *définies* qui se trouvent toutes formées dans les êtres organisés, ou qui proviennent de celles-ci par des modifications que chaque jour nous apprend à modifier davantage.

« Ces matières sont définies quand elles jouissent de la propriété de cristalliser régulièrement, ou de former des combinaisons cristallisables, aussi bien que lorsqu'elles possèdent la propriété de se volatiliser à un terme fixe...

« La physiologie végétale ou animale devrait se réserver l'histoire de toutes les substances *organisées*, comme le ligneux, la fibrine, et tant d'au-

tres qui, aux yeux du chimiste, manquent des caractères essentiels signalés plus haut[1] ».

Cette distinction entre les deux groupes des substances organiques et des substances organisées est fondamentale, et méritera de nous arrêter plus longtemps : au point de vue de la synthèse, ils se présentent très différemment, et Liebig, comme plus tard son élève Gerhardt, a déjà fait cette observation :

« A l'aide des agents chimiques, on pourra bien produire les éléments de la fibre musculaire, de la peau, des cheveux, etc., mais jamais on ne créera un cheveu, une fibre, une cellule...[2] »

Il est toujours imprudent de dire : Jamais on ne fera ceci ; mais on en a presque le droit ici, car toutes les synthèses que j'ai énumérées se rapportent à des substances organiques au sens de Dumas, tandis que jusqu'ici *pas une seule substance organisée*, c'est-à-dire possédant une structure, n'a pu être reproduite avec des caractères identiques à ceux qu'elle offre dans la nature. En sera-t-il toujours ainsi, ou bien n'avons-nous comme obstacle, devant nous, que notre ignorance ? C'est peut-être le problème le plus important que se pose aujourd'hui la chimie, et ce problème mérite d'être discuté à part. Il fallait le mentionner ici, car les triomphes de la synthèse ne doivent pas nous faire oublier tout ce qui reste à conquérir.

1. *Traité de chimie appliquée aux arts*, t. V, p. 1, 1835.

2. *Chimie organique*, 1840. Introduction, p. CLXXXII. — Gerhardt, en 1853, exprime la même opinion en termes très semblables. (*Chimie organique*. Introduction, p. IV.)

CHAPITRE III

LES NOTIONS DE SYMÉTRIE

Nous venons de voir que si Macquer, en 1789, considérait comme probable qu'il y eût une différence essentielle entre les substances organiques et les substances inorganiques, cette doctrine avait rapidement disparu de la science chimique, et que Dumas, dès 1835, considérait comme désormais établi que nulle propriété fondamentale ne séparait ces deux groupes de composés. Il est assez curieux que trente ans après, un nouveau progrès de la science, progrès dû aux découvertes de Pasteur concernant le pouvoir rotatoire des substances organiques, ait tout remis en question. Le débat qui s'est ouvert à cette époque s'est terminé, comme le premier, par la victoire du laboratoire sur la nature ; mais nul ne croyait, avant qu'il recommençât, qu'il y eût à revenir sur cette question, comme nul ne le croit aujourd'hui ; et lorsqu'on réfléchit à ces circonstances, on se demande si cette victoire est définitive, et si la distinction déjà deux fois évanouie ne reparaîtra pas un jour sous une forme nouvelle quand nous connaîtrons les faits plus à fond.

On sait en quoi consiste le phénomène du pouvoir rotatoire : un certain nombre de substances ont, en solution dans l'eau, la propriété de faire tourner le plan de polarisation d'un rayon de lumière qui les traverse. Ces corps sont dits *actifs*, par opposition avec les corps *inactifs* qui n'influent pas sur l'orientation de ce plan. Les uns, corps *droïts*, le font tourner à droite ; les autres, corps *gauches*, à gauche ou en sens inverse du mouvement des aiguilles d'une montre. Or, presque sans exception, les composés naturels (acide tartrique, acide urique, amidon, acide malique, sucre, camphre, alcaloïdes, albumine) sont actifs ; au contraire, les composés minéraux ou les corps organiques obtenus par synthèse, sont généralement inactifs. En 1860 Pasteur, auquel ses convictions rendaient presque incroyable que les produits de la création ne portassent pas une marque distinctive, croyait avoir trouvé là le moyen de séparer, d'une façon définitive, les composés créés par la vie des produits de laboratoire.

« ... Les produits artificiels n'ont donc aucune dissymétrie moléculaire [1], et je ne saurais indiquer l'existence d'une séparation plus profonde entre les produits nés sous l'influence de la vie et tous les autres...

« Il y a beaucoup de substances naturelles qui ne sont pas dissymétriques. Mais sont-elles naturelles aux mêmes titres que les autres ? Ne faut-il

1. Le pouvoir rotatoire est intimement lié à l'existence d'une dissymétrie moléculaire.

pas voir dans ces corps, tels que l'acide oxalique, des dérivés des substances naturelles proprement dites, formés par des actions analogues à celles des laboratoires..., des excrétions plutôt que des sécrétions, si je puis ainsi parler...

« Ainsi se trouve introduite dans les considérations et les études physiologiques l'idée de l'influence de la dissymétrie moléculaire des produits organiques naturels, de ce grand caractère qui établit peut-être la seule ligne de démarcation bien tranchée que l'on puisse placer aujourd'hui entre la chimie de la nature morte et la chimie de la nature vivante [1]. »

Disons tout de suite que, sous la forme qu'il leur a donnée ici, les idées de Pasteur ne sont pas exactes : il n'a pu les soutenir qu'en raison du peu d'avancement de la synthèse en 1860. Mais, dès le mois d'avril de la même année, Perkin et Duppa préparaient l'acide tartrique, c'est-à-dire le corps même sur lequel avaient porté les expériences de Pasteur, en partant de l'acide succinique, et en 1873 Jungfleisch obtenait lui-même l'acide succinique en partant de l'éthylène. La synthèse totale de l'acide tartrique, corps actif, était faite aux dépens de corps inactifs et même inorganiques ; l'activité optique n'était donc pas caractéristique de la vie, et, si Pasteur avait pu le croire, c'est que les premiers composés obtenus par synthèse étant naturellement les plus simples, étaient privés de la dis-

1. Pasteur. *Leçons professées à la Société chimique*, janvier et février 1860.

symétrie moléculaire sans laquelle il n'y a pas de pouvoir rotatoire[1].

Par un privilège sans doute réservé aux hommes de génie, Pasteur était passé si près de la vérité qu'il suffirait aujourd'hui de changer quelques mots à ce qu'il a dit pour le mettre à l'abri de toute critique. Les produits organiques sont, comme je l'ai dit, *droits* ou *gauches* : une même espèce chimique, l'acide tartrique par exemple, existe sous deux formes : l'acide droit et l'acide gauche. Ces deux formes ont *identiquement* les mêmes propriétés physiques et chimiques, à l'exception d'une seule, leur action sur la lumière polarisée, qui est la même *en grandeur absolue* pour les deux. Mélangés en proportions égales, ils sont sans action sur cette lumière, l'effet de l'un étant exactement contrebalancé par l'effet de l'autre. Si les produits naturels sont actifs, c'est que les deux isomères (*stéréoisomères*) n'y existent pas en proportions égales : l'un est en excès, et donne son signe au mélange. Il peut même arriver qu'il n'y existe qu'un de ces isomères : c'est ainsi qu'au sucre de canne ordinaire, ou à l'amidon, devraient correspondre un sucre et un amidon de signe contraire et de même pouvoir rotatoire absolu, qui ne sont connus ni l'un ni l'autre.

Au contraire, toutes les fois que, par synthèse, on a obtenu un corps actif en partant de compo-

1. Pasteur a du reste lui-même renoncé à ses premières idées. Celles qu'il a professées ensuite (*Comptes rendus*, t. LXXVIII et t. LXXXI) sont à très peu près conformes aux idées actuelles.

sés inactifs, on a obtenu en même temps, en quantités égales, le composé actif droit et le composé actif gauche : le mélange auquel on arrive est alors inactif par compensation. Par exemple, par le procédé de Jungfleisch, Perkin et Duppa, on transforme l'éthylène en un mélange en proportions égales d'acides tartriques droits et gauches, et ce mélange examiné au polarimètre est inactif. D'une façon générale, si l'on fait réagir les uns sur les autres d'une manière quelconque des corps inactifs, le résultat, examiné en bloc, sera toujours inactif : tandis qu'il est à peu près impossible d'extraire d'un végétal ou d'un animal un produit qui ne soit pas actif. En gros, l'affirmation de Pasteur reste donc vraie.

Elle est même encore plus vraie qu'il ne résulte de ce qui précède. En effet, on pourrait croire qu'une fois en possession de ce mélange inactif par compensation, on n'aura plus grand chose à faire pour parvenir à une imitation complète de l'œuvre de la nature, puisqu'il suffira de séparer les deux isomères pour obtenir, à volonté, l'un ou l'autre.

Or, cette séparation est, en général, très difficile si on ne dispose que des ressources et des produits de la chimie de synthèse. Les deux isomères ont la même densité, la même solubilité, la même tension de vapeur. Leurs combinaisons avec des corps inactifs ont aussi les mêmes propriétés : le plus souvent, elles cristallisent ensemble et les cristaux contiennent des proportions égales des deux, de telle sorte qu'on est tenté de

croire qu'on a affaire à une substance unique[1]. Exceptionnellement, les deux sels cristallisent isolément : c'est le cas du racémate (mélange de tartrates droits et gauches) double de soude et d'ammoniaque qui, au-dessous de 28°, donne séparément des cristaux des deux isomères : c'est encore le cas de l'asparagine. Mais, malgré ces quelques succès isolés, la méthode de séparation par cristallisation est très incertaine.

Au contraire, la question devient beaucoup plus simple si l'on fait intervenir une autre substance active, un produit de la vie. Ainsi, les tartrates droits et gauches de soude ont des propriétés identiques, parce que la soude est inactive. Au contraire, si l'on combine l'acide tartrique à la cinchonicine, alcaloïde actif extrait de l'écorce de quinquina, le tartrate droit est plus soluble que l'autre : de telle sorte que si l'on fait cristalliser le mélange, le gauche se dépose d'abord et se sépare ainsi très facilement. On peut encore, et plus simplement, faire intervenir un organisme vivant : ainsi, dans une solution de racémate d'ammoniaque, le *Penicillium glaucum* mange l'isomère droit et laisse intact l'isomère gauche. Le même Penicillium préfère l'alcool amylique gauche à l'alcool amylique droit : il s'attaque à

1. C'est ainsi que Pasteur, ayant préparé à partir d'un acide aspartique inactif un acide malique également inactif, crut que ce dernier ne pouvait être dédoublé. Cette impossibilité fut généralement admise, et l'existence de l'acide malique inactif fut donnée par Berthelot comme un argument contre les idées stéréo-chimiques de van't Hoff. On ne tarda cependant pas à reconnaître que le corps obtenu par Pasteur était un mélange des acides droit et gauche.

l'acide formobenzoïque gauche, tandis qu'une levure détruit de préférence l'acide formobenzoïque droit. Alors que, au laboratoire, les réactions des corps droits et gauches sont le plus souvent identiquement les mêmes, dans la nature il n'y a presque pas de cas où ils se comportent de la même manière. La séparation des isomères, qui est pour nous une difficulté, n'est qu'un jeu pour elle : l'idée de Pasteur est donc, comme je le disais, *presque* vraie, parce qu'il nous est *presque* impossible d'obtenir, avec nos seules ressources, un produit actif et séparé de son isomère.

Envisageons maintenant la question sous une autre face. Du fait que la synthèse nous donne toujours un mélange inactif par compensation, et jamais l'un des composés sans l'autre, résulte-t-il une infériorité de nos méthodes par rapport à celles qu'emploie la cellule vivante, et sont-elles essentiellement différentes ? En aucune manière. Il y a simplement ici une application de ce principe général sur lequel Curie a beaucoup insisté : une cause symétrique ne peut produire que des effets symétriques, ou, en d'autres termes, la symétrie des causes doit se retrouver dans les effets.

Le pouvoir rotatoire est lié, suivant les doctrines stéréochimiques, à un fait très simple. Si certains éléments de symétrie existent dans la molécule, celle-ci n'a pas le pouvoir rotatoire : le composé est inactif. Il est actif dans le cas contraire. Prenons une image : la tête d'un

homme, qui a les éléments de symétrie convenables, n'a pas le pouvoir rotatoire : elle l'acquiert si cet homme est borgne, parce que la symétrie est détruite. Certaines molécules, celles de l'alcool ordinaire par exemple, sont des têtes normales, symétriques; d'autres, celles de l'acide tartrique, sont des têtes de borgnes, dissymétriques. Une réaction chimique fera disparaître la symétrie et créera le pouvoir rotatoire si elle crève un œil de la molécule. Ainsi, par exemple, le pentane CH^3-CH^2-C^3H^7 est inactif : l'atome de carbone central porte deux yeux-hydrogène symétriquement placés. Que l'on remplace, comme l'a fait Le Bel, un de ces yeux-hydrogène par un atome d'iode, on obtient l'iodure d'amyle secondaire CH^3-CHI-C^3H^7 qui est borgne et actif. Comme tel, il se présente sous la forme d'un mélange de deux isomères dont l'un aura l'iode dans l'œil droit, l'autre l'iode dans l'œil gauche. Or, dans le pentane, les deux atomes d'hydrogène, par eux-mêmes identiques entre eux, sont, de plus, placés symétriquement ; ils ont donc nécessairement des propriétés identiques, et par suite il n'y a aucune raison pour que les atomes d'iode se substituent à celui de droite plutôt qu'à celui de gauche. Il doit donc se produire autant de molécules de l'isomère droit que de l'isomère gauche, et par suite le mélange devra être inactif, comme le confirme l'expérience[1]. De même, à la fin d'une guerre, on peut

1. En réalité, il y a toujours un excès des molécules d'un certain signe : il faut, comme l'a indiqué Le Bel, traiter le problème par le calcul des probabilités. Or, dans une molécule-gramme, il y

compter que sur l'ensemble des troupes on trouvera à peu près autant d'estropiés gauches que d'estropiés droits. Seulement, ici, nous avons affaire à de très grosses molécules que nous pouvons placer individuellement, et il serait facile de s'arranger pour que tout le monde fût blessé à droite, car il suffirait de se présenter toujours à l'ennemi par le flanc droit. En faisant ceci, on introduirait une dissymétrie, puisque le flanc droit et le flanc gauche n'occuperaient plus des situations comparables. De même, en chimie, il faudrait, pour que nous puissions reproduire absolument l'œuvre de la nature, faire intervenir une dissymétrie [1].

Notre imitation est imparfaite parce que nous ne connaissons pas beaucoup de forces dissymétriques susceptibles d'agir, et parce que nous les manions mal. Dans un cas cependant, l'expérience a été tentée. M. A. Cotton a remarqué que certaines solutions (tartrates de cuivre et de chrome) étaient décomposées par la lumière, et qu'elles absorbaient inégalement les vibrations circulaires droites et gauches. De là résulte une très grande probabilité pour qu'un rayon circu-

a environ $7,10^{23}$ molécules : on ne peut faire une mesure sur moins de 1/10.000 molécule-gramme, ou $7,10^{19}$ molécules. Pour que l'on constate un pouvoir rotatoire, il faut que l'excès des molécules droites soit d'au moins 1 1.000, soit $7,10^{16}$. Or la probabilité, pour que, en puisant au hasard $7,10^{23}$ boules dans un sac contenant des boules blanches et noires en nombre égal, on ait à la fin $7,10^{16}$ boules blanches de plus que de noires ou inversement, est extrêmement faible : le logarithme de son inverse est, en effet, de l'ordre de 1 milliard (Borel, *Calcul des probabilités*, p. 48).

1. Cette notion a été développée par Pasteur en 1874.

laire d'un sens déterminé détruise inégalement, dans un mélange à proportions égales, le tartrate droit et le tartrate gauche, et pour que ce mélange, que nous savons produire inactif par synthèse totale, acquière ainsi un pouvoir rotatoire par la disparition de l'un des composants. L'expérience tentée par M. Cotton n'a pas donné de résultats, probablement parce qu'il n'avait pas à sa disposition de moyens suffisants. On ne peut rien en conclure ni dans un sens ni dans l'autre, et la question reste posée.

Nous avons été conduits à invoquer l'existence, dans la nature, de forces dissymétriques. Quelles sont-elles ? Dans le règne végétal, tous les composés sont formés à partir de l'acide carbonique et de l'eau, qui sont des corps symétriques : et sous l'action de la lumière qui est, elle aussi, une force symétrique. Tout doit donc provenir d'une dissymétrie première, qui est celle de la graine. Le végétal tout entier n'est qu'une graine développée, et il est parfaitement compréhensible que les forces dissymétriques qui existent dans cette graine (comme conséquence de la présence de substances actives) et qui président à la germination ou au développement, entretiennent la dissymétrie, même quand elles agissent sur l'acide carbonique, la lumière et l'eau.

Il resterait à expliquer pourquoi la graine est, elle-même, dissymétrique. C'est un peu la question de l'œuf et de la poule : l'espèce poule a-t-elle commencé par un œuf, et alors, d'où venait-il ? ou bien par une poule, et alors, qui

l'a aidée à faire un œuf ? A moins de supposer que les graines ou les germes animés soient venus d'une autre planète (ce qui ne ferait que reculer la difficulté), il faut bien que leur dissymétrie soit d'origine terrestre. Pourquoi, alors, étant nés de causes symétriques (matière minérale, chaleur, lumière) ne le sont-ils pas eux aussi ? C'est peut-être (car on ne peut rien affirmer) que ces causes ne sont pas *absolument* symétriques. Par exemple, le soleil se lève à l'est et se couche à l'ouest : il est possible que l'effet des rayons solaires ne soit pas absolument le même que s'il se levait à l'ouest et se couchait à l'est[1]. Peut-être aussi la lumière solaire contient-elle un excès de lumière polarisée circulairement d'un certain signe, auquel cas nous nous trouverions dans le cas des expériences de M. Cotton : il est actuellement impossible d'affirmer que cet excès n'existe pas au moins égal à $\frac{1}{10.000}$ et même à $\frac{1}{1.000}$, encore qu'on ne voie pas d'où il pourrait provenir. Tout ce qui se rapporte à la dissymétrie des forces naturelles est encore obscur et incertain.

Je terminerai ce chapitre en mentionnant une application assez curieuse de ces notions de symétrie. Il s'agit de l'origine des pétroles. Cette

1 Si cette cause agissait réellement, et agissait seule, les plantes de l'hémisphère austral devraient contenir des substances inverses de celles de l'hémisphère boréal, à condition qu'il n'y ait jamais eu communication entre les deux. Cette condition n'étant pas réalisée, toute vérification est illusoire.

origine est fort discutée : pour ne mentionner que les opinions extrêmes, les uns y voient le produit de l'action de l'eau sur les carbures métalliques (et en effet Moissan a montré que certains de ces carbures, notamment le carbure d'uranium, réagissaient sur l'eau en donnant des hydrocarbures liquides très voisins des pétroles); d'autres soutiennent que les pétroles sont d'origine végétale ou animale, et représentent des produits de putréfaction (le méthane ou gaz des marais, produit par la putréfaction de la vase, est le premier terme de la série des carbures saturés qui constituent les pétroles d'Amérique). Or, on constate que certains pétroles ont le pouvoir rotatoire, et ce fait est un argument assez sérieux contre l'origine purement minérale des pétroles. Toutefois, comme une assez forte proportion des roches qui constituent la terre sont d'origine animale, il faudrait peut-être, avant de discuter cette question, s'assurer qu'elle a un sens, et que nous n'appelons pas une même chose par deux noms différents.

CHAPITRE IV

LA FONCTION CHLOROPHYLLIENNE

Les parties vertes des plantes, et en particulier les feuilles, doivent leur coloration à un pigment, la chlorophylle. Ce pigment n'y existe pas seul ; il est associé à d'autres, d'une couleur différente, et peut en être séparé au moyen de dissolvants appropriés tels que le sulfure de carbone, l'éther de pétrole et la benzine.

On sait que c'est justement aux parties vertes des plantes, chargées de chlorophylle, qu'appartient la propriété d'assimiler le carbone, c'est-à-dire de décomposer l'acide carbonique de l'air, d'en retenir le carbone à l'état de combinaisons formant les tissus de la plante, et de laisser dégager l'oxygène. Il était tout naturel de rapporter cette action décomposante et assimilatrice au pigment vert contenu dans les feuilles, puisqu'elle ne peut être constatée que là où ce pigment existe [1]. Aussi, quoiqu'il ne

1. Pour la majorité des plantes. Un certain nombre d'algues sans chlorophylle peuvent assimiler le carbone. La même propriété appartient, d'après Winogradsky, à certaines bactéries incolores. A côté de la chlorophylle, les feuilles contiennent un pigment rouge, la carotine, qui paraît être aussi universellement répandu, et dont le rôle physiologique est inconnu.

soit pas prouvé encore qu'il en est bien ainsi, a-t-on donné à cette fonction des plantes le nom de *fonction chlorophyllienne*.

Chose curieure, cette fonction, sur laquelle aujourd'hui on ne sait encore que relativement peu de chose, est une de celles sur lesquelles on a obtenu les premières notions scientifiques exactes. En 1771, avant même d'avoir découvert l'oxygène, Priestley a montré que les feuilles vertes absorbaient *l'air fixe* (acide carbonique) et rendaient à nouveau respirable une atmosphère viciée par la combustion d'une chandelle. En 1779, ayant dans l'intervalle découvert *l'air déphlogistiqué* ou oxygène, et trouvé un moyen d'apprécier la proportion d'oxygène contenue dans l'air, il put reprendre ses premières expériences avec plus de précision et montrer que, en même temps qu'elles absorbaient l'acide carbonique, les feuilles dégageaient de l'oxygène : toutefois, il constata des irrégularités qui l'amenèrent à douter de ses propres expériences. Ces irrégularités furent expliquées, entre 1779 et 1800, par Ingenhousz, qui mit en évidence le rôle de la lumière, nécessaire au dégagement d'oxygène, mais ne put rien affirmer quant à l'origine de cet oxygène. La lacune fut comblée, à la même époque, par Senebier : ce dernier montra que l'oxygène provenait de l'acide carbonique, et que par suite il ne s'en dégageait pas lorsque la plante vivait dans un milieu dépourvu de cet acide [1]. Il n'y avait alors plus aucun doute que

1. Cette découverte avait échappé à Priestley. Celui-ci avait vu souvent se développer spontanément une matière verte, glaireuse.

les végétaux avaient, dans les conditions de l'expérience, la faculté de décomposer l'acide carbonique et d'en laisser échapper l'oxygène. La preuve manquait qu'il en fût de même dans la nature, et, quoique Senebier pensât qu'il en était bien ainsi, la très faible concentration de l'acide carbonique dans l'air (3 parties sur 10.000) ne laissait pas que de l'embarrasser quelque peu.

Cette difficulté fut entièrement tranchée par De Saussure à la suite de très longues recherches, exposées dans un livre paru en 1804. De Saussure montra que les plantes ne pouvaient vivre dans une atmosphère privée d'acide carbonique, et que l'eau qu'elles absorbaient par les racines contenait en dissolution une quantité de ce gaz tout à fait insuffisante pour expliquer leur croissance et l'augmentation de leur poids : que, par suite, elles absorbaient réellement l'acide carbonique de l'air, quelque faible qu'en fût la proportion. D'ailleurs, en analysant l'atmosphère dans laquelle une plante vit à la lumière, et en comparant sa composition initiale à sa composition après un certain temps, on constate que l'acide carbonique disparaît : et, chose très intéressante et dont la découverte revient entièrement à De Saussure, *pour chaque volume d'acide carbonique disparu il apparaît un volume égal d'oxygène.*

à la surface de flacons remplis d'eau et exposés à la lumière. De cette matière verte se dégageaient des bulles d'oxygène. Priestley n'avait pas reconnu la nature végétale de cette matière verte (formée d'algues microscopiques) et pensait qu'elle opérait *mécaniquement* la séparation de l'oxygène, formé directement dans l'eau par l'action de la lumière.

Il résulte de là que l'assimilation se fait selon la formule

$$CO^2 = C + O^2$$

c'est-à-dire que tout se passe, au point de vue des échanges avec l'extérieur, comme si la plante décomposait l'acide carbonique, retenait le carbone et mettait en liberté l'oxygène. Seulement, bien entendu, dans la réalité, une pareille équation ne représente rien : ce n'est pas du carbone qui se dépose, ce sont des composés du carbone : l'équation écrite plus haut résume simplement la balance des comptes en fin d'exercice, sans nous indiquer quelles opérations ont été faites ; et nous avons encore à rechercher par quelle suite de réactions chimiques, et à quel état le carbone est finalement retenu.

Je me hâte de dire que cette question n'est pas entièrement résolue : on admet provisoirement, comme la plus vraisemblable, l'hypothèse émise par Baeyer [1] en 1870 et d'après laquelle le premier corps formé serait de l'aldéhyde formique. La réaction se ferait entre une molécule de gaz carbonique et une molécule d'eau

$$CO^2 + H^2O = O^2 + CH^2O$$

1. L'hypothèse de Baeyer a joué, dans la science chimique, un rôle très considérable : c'est, en effet, le désir de la vérifier qui a entraîné Emile Fischer à faire la synthèse des sucres, c'est-à-dire l'un des travaux les plus importants de chimie organique accomplis jusqu'à ce jour. Cette vérification avait tenté d'autres chimistes, en particulier Würtz, qui n'avait pu y parvenir. Il est assez curieux de constater que, malgré l'extrême importance de cette question de l'assimilation chlorophyllienne, fort peu de chimistes s'en occupent.

l'oxygène se dégagerait et l'aldéhyde formique se polymériserait immédiatement en donnant des sucres.

La vérification de cette hypothèse s'est montrée extrêmement difficile. Le plus simple serait, évidemment, de constater directement l'existence de l'aldéhyde dans les feuilles insolées, et son absence dans les feuilles maintenues à l'obscurité. Malheureusement cette aldéhyde, à l'état libre, se polymérise très rapidement, c'est-à-dire que plusieurs molécules s'unissent pour former un composé condensé dont les propriétés sont absolument différentes. Si donc il s'en forme, elle doit disparaître aussitôt, c'est-à-dire pendant le temps qu'on met à récolter les feuilles et à leur faire subir les divers traitements destinés à isoler l'aldéhyde. Il est, dans ces conditions, presque inutile de la rechercher, car, si on en avait arrosé les feuilles, on ne serait pas sûr de la retrouver. De plus, tant de substances organiques donnent de l'aldéhyde formique en se décomposant, que celle que l'on pourrait recueillir pourrait très bien ne pas avoir préexisté dans la feuille, mais s'être formée pendant les diverses manipulations que celle-ci a eu à subir. Les résultats de Pollaci, et ceux plus récents de Usher et Priestley qui ont cru caractériser par plusieurs réactions l'aldéhyde extraite des feuilles, ne peuvent pas, pour cette raison, être considérés comme décisifs, et ce premier stade de l'assimilation demeure hypothétique.

On peut, il est vrai, en trouver une vérification

indirecte. Si l'aldéhyde formique se polymérise dans les feuilles, comme elle le fait *in vitro*, nous devons nous attendre à rencontrer dans ces feuilles des produits de polymérisation identiques à ceux que nous obtenons au laboratoire ; et réciproquement, si nous constatons cette identité, il sera probable que l'origine de ces produits est la même dans les deux cas. L'observation des dérivés de la formaldéhyde pourra, jusqu'à un certain point, remplacer l'observation directe de cette aldéhyde.

Voyons d'abord quels sont les produits naturels. L'observation a montré depuis longtemps que, dans une feuille exposée au soleil, il se forme un dépôt d'amidon autour des grains de chlorophylle. Cette formation est même si rapide que Sachs avait vu dans l'amidon l'un des premiers, sinon le premier produit de l'assimilation. En réalité il n'en est pas ainsi : il est beaucoup plus probable que, comme le pensent Brown et Morris, l'amidon résulte de la transformation d'autres substances plus simples, le saccharose ou sucre de cannes, le glucose, le maltose ou le lévulose, que le chimiste désigne, à cause de leur saveur commune, sous le nom générique de *sucres*. Ces substances sont, au point de vue chimique, très voisines les unes des autres : le saccharose et le maltose sont deux *isomères*, c'est-à-dire des corps ayant la même formule de constitution $C^{12}H^{22}O^{11}$, le glucose et le lévulose sont deux isomères $C^6H^{12}O^6$ et chacun des deux premiers se transforme très facilement dans l'un ou dans un mélange des

deux autres. L'amidon lui-même est un proche parent, aisément transformé soit en maltose, soit en glucose : c'est seulement un corps plus complexe, une sorte de maltose polymérisé, devenu insoluble et privé de la saveur sucrée caractéristique des produits plus simples [1].

Quelle est la première de ces substances qui se forme et comment se transforme-t-elle dans les autres ? Ou même, s'en forme-t-il une seule, ou bien tout de suite un mélange ? Cette question n'est pas complètement résolue : peut-être y a-t-il une solution différente pour chaque plante. En ce qui concerne par exemple les capucines, les expériences de Brown et Morris semblent prouver qu'il se forme d'abord du saccharose (sucre ordinaire) et de l'amidon : ce dernier étant lui-même un dérivé du premier, une sorte de réserve qui se forme lorsque la quantité de saccharose dépasse une certaine limite. Le glucose et le lévulose seraient des produits de dédoublement du saccharose (ce dédoublement est, en effet, facilement réalisable) ; le maltose résulterait du dédoublement de l'amidon, dédoublement facilement observable aussi.

1. Tous ces corps sont des *hydrates de carbone*, c'est-à-dire des composés contenant du carbone et, en plus, de l'hydrogène et de l'oxygène dans les mêmes proportions où ils existent dans l'eau : deux atomes d'hydrogène pour un d'oxygène. Ils diffèrent par les proportions d'eau (des éléments de l'eau) unies au carbone et se transforment les uns dans les autres par absorption d'eau. C'est ainsi que l'amidon $C^6H^{10}O^5$ ou $C^6(H^2O)^5$ donne successivement le maltose $C^{12}H^{22}O^{11}$ ou $C^{12}(H^2O)^{11}$ et le glucose $C^6H^{12}O^6$ ou $C^6(H^2O)^6$. A un atome de carbone s'unissent successivement $\frac{5}{6}$, $\frac{11}{12}$ et 1 molécule d'eau.

En est-il de même pour toutes les plantes et, sinon le saccharose, du moins un sucre est-il toujours le premier produit formé ? Si l'on remarque que ces sucres sont des composés extrêmement répandus dans le règne végétal, on trouvera l'hypothèse assez vraisemblable. L'amidon seul, aussi répandu qu'eux, pourrait leur disputer cette place ; mais il semble plutôt que ce soit une *réserve*, car il se forme dans les feuilles exposées au soleil, c'est-à-dire au moment même de l'assimilation, et il disparait pendant la nuit, en partie brûlé, en partie transformé en d'autres corps plus complexes tels que la cellulose ou la matière azotée des feuilles ; et il semble aussi qu'il ne s'en produise que lorsque la quantité des sucres dépasse une certaine limite [1], ce qui est beaucoup plus facilement explicable si ces sucres sont formés antérieurement à lui : car il est assez naturel de supposer que l'accumulation indéfinie de ces sucres finisse par gêner la plante et qu'elle s'en débarrasse en les transformant en amidon insoluble, dont la présence n'est pas gênante. Ainsi, jusqu'à plus ample informé, nous avons tout lieu de croire que les premiers produits d'assimilation sont les sucres.

Si l'hypothèse de Baeyer est exacte, ils devront aussi se trouver parmi les produits de polymérisation de l'aldéhyde formique ; et ils s'y trouvent en effet, ou du moins l'un d'entre eux.

1. Limite très variable d'un végétal à l'autre : 20 p. 100 pour la canne à sucre, 1 p. 100 pour la feuille de vigne.

L'aldéhyde formique, au contact des alcalis, se polymérise rapidement en donnant un mélange complexe dont on a retiré deux corps principaux : l'un, le formose, est un sucre isomère du glucose et dont la constitution est mal connue ; l'autre est le *i-fructose* ou fructose inactif, sucre fermentescible, dont la fermentation donne de l'alcool et qui est formé pour la moitié de son poids de lévulose identique au lévulose naturel, sucre qui est extrêmement répandu chez les végétaux et forme la moitié du poids du sucre de canne.

La polymérisation de la formaldéhyde devrait donner tous les sucres naturels : elle n'en donne qu'un seul. Mais celui-ci peut lui-même être transformé assez facilement en d'autres isomères ou en corps de constitution voisine : la mannite, le glucose, la sorbite, qui sont eux aussi des sucres naturels, de telle sorte qu'il est vraisemblable qu'ils peuvent aussi se former directement à partir de l'aldéhyde formique, dans des conditions différentes que la nature réalise et qui ne nous sont pas connues. L'hypothèse de Baeyer est donc ici assez bien confirmée. Elle le serait mieux encore si nous savions remonter de ces matières sucrées à d'autres plus complexes telles que le maltose, le saccharose et l'amidon ; mais les essais tentés dans ce sens ont échoué.

Nous pouvons soumettre cette hypothèse à une autre épreuve. Si la plante crée, puis polymérise l'aldéhyde formique, elle doit pouvoir s'accommoder d'aldéhyde formique toute faite, et d'autant mieux que son travail s'en trouve simplifié. Elle devrait donc prospérer, même privée

d'acide carbonique, dans une atmosphère chargée de vapeurs aldéhydiques. Il n'en est rien et, au contraire, ces vapeurs se montrent extrêmement toxiques, dès qu'elles existent en quantité notable. Il y a là une difficulté, mais qui peut être levée immédiatement : comme tous les poisons, l'aldéhyde formique n'est dangereuse qu'au-delà d'une certaine quantité et, si la plante qui l'élabore la polymérise à mesure, jamais elle ne sera en quantité suffisante pour lui nuire. Pour vérifier ses propriétés nutritives il faudra imiter le mieux possible ces conditions, c'est-à-dire fournir à la plante de l'aldéhyde formique extrêmement diluée ; et, comme il en faut cependant une certaine quantité, le mieux sera de l'engager dans une combinaison facilement, mais pas trop facilement dissociable. Telle est celle que forme l'aldéhyde formique avec le bisulfite de soude, l'oxyméthylsulfonate de sodium ; et, en effet, Bokorny a montré qu'une algue verte très commune dans les fontaines, le spirogyre, pouvait assimiler au soleil le carbone de cette solution. A vrai dire, le résultat n'est pas extrêmement brillant ; on constate cependant, d'une façon indéniable, la production de grains d'amidon, ainsi qu'une augmentation du poids de la plante. C'est tout ce qu'on demande : on ne peut pas s'attendre à ce qu'une plante, fût-ce l'algue la plus accommodante, se fasse ainsi du jour au lendemain au régime de l'oxyméthylsulfonate de sodium.

Le même raisonnement que nous venons de faire à propos de la formaldéhyde peut être

répété pour les sucres : si ceux-ci constituent un stade nécessaire de l'assimilation, la plante doit pouvoir en tirer parti si on les lui donne tout faits, c'est-à-dire qu'elle doit pouvoir vivre et prospérer, à l'abri de l'acide carbonique, avec le sucre pour seul aliment. Cette conséquence est encore vérifiée : Laurent, et après lui M. Mazé, ont pu faire soit germer, soit pousser des plantes dans des solutions de saccharose, de glucose, de sucre interverti. M. Mazé, en particulier, a pu obtenir ainsi des plantules dont le poids, à l'état sec, était le quadruple du poids de la graine et pour lesquelles, par suite, l'assimilation était indéniable [1]. Il s'agit ici de plantes supérieures (maïs, haricots, etc.), et non plus d'algues, comme dans l'expérience de Bokorny ; aussi le résultat n'est-il pas brillant non plus et les jeunes plantes nourries de confiture ont-elles le teint jaune et pâle des dyspeptiques.

Cet ensemble de preuves, ou plus exactement d'indications, encourage à accepter l'hypothèse de Baeyer. Admettons donc que tout se passe conformément à cette hypothèse : il nous reste à savoir *comment* cela se passe, c'est-à-dire par

1. Toutes ces expériences ne prouvent pas que le carbone assimilé traverse réellement le stade formaldéhyde ou sucre, mais simplement qu'il n'y a pas contradiction entre cette hypothèse et l'expérience. En effet, les plantes peuvent se nourrir de bien d'autres substances carbonées que celles-ci. Bokorny a fait vivre des algues dans des solutions d'asparagine, de leucine, de tyrosine, de peptone, d'acides citrique, tartrique ou lactique ; et il est invraisemblable que toutes ces substances soient des produits directs d'assimilation.

quels mécanismes s'effectuent toutes les réactions. Pour tenir la clef d'un phénomène naturel, il ne suffit pas d'en connaître le résultat brut : il faut le décomposer en réactions élémentaires et savoir pourquoi et comment chacune se produit. Comme je le disais en commençant, le moyen le plus sûr d'y arriver est de reproduire le phénomène au laboratoire, par des moyens semblables à ceux qu'emploie la nature.

Je dis : par des moyens semblables, car nous avons vu au chapitre précédent que le chimiste affranchi de cette restriction peut, dans tous les cas, arriver au même résultat qu'elle. Ici encore il n'aurait aucune difficulté à transformer une molécule d'acide carbonique et une d'eau en une molécule d'oxygène et une d'aldéhyde formique [1], mais par un cycle de réactions nécessitant l'emploi de réactifs ou de températures que la plante n'a pas à sa disposition. Le problème ne serait pas résolu de cette manière : il ne le sera que si, à la température ordinaire et sans autre source d'énergie que les rayons lumineux, nous parvenons à transformer l'acide carbonique et l'eau en aldéhyde formique et oxygène.

1. Il lui suffirait d'opérer la suite de réactions suivantes, toutes bien connues :

$$3H^2O = 3H^2 + 3O$$
$$4H^2 + CO^2 = CH^4 + 2H^2O$$
$$CH^4 + Cl^2 = CH^3Cl + HCl$$
$$CH^3Cl + KOH = CH^4O + KCl$$
$$CH^4O + O = CH^2O + H^2O$$
$$HCl = H + Cl$$
$$KCl = K + Cl$$
$$K + H^2O = KOH + H$$

dont la somme est bien la réaction voulue

$$CO^2 + H^2O = CH^2O + O^2.$$

Un premier chemin nous mène en vue du but à atteindre. On a découvert récemment que certains rayons lumineux, les rayons ultra-violets (qui existent dans la lumière solaire), décomposent l'acide carbonique en oxyde de carbone et oxygène. Berthelot a montré, d'autre part, que l'oxyde de carbone est absorbé par les alcalis en donnant des formiates. Il n'y a plus qu'un pas de ceux-ci à la formaldéhyde, mais ce pas n'a pas encore été franchi. Peut-être l'est-il si l'on fait intervenir des sels d'urane ; d'après Bach, si l'on fait passer, au soleil, un courant d'acide carbonique dans une solution d'un sel d'urane, il se produit de l'aldéhyde formique, et même une partie de celle-ci se polymérise immédiatement en donnant des produits analogues aux sucres. Comme le sel d'urane est là uniquement pour absorber l'oxygène à mesure qu'il se forme, et que ce rôle d'absorbant pourrait être tenu par des substances organiques existant dans les feuilles, on voit que cette expérience est faite dans des conditions assez voisines des conditions naturelles. Elle éclairerait entièrement la question de l'assimilation si elle ne prêtait pas encore à la discussion[1], mais elle n'a pas été assez sou-

1. Euler, qui a répété cette expérience, n'a pu obtenir le même résultat et conclut à une erreur. Cependant Usher et Priestley ont, depuis, confirmé Bach. On voit que tout ceci n'est pas définitivement acquis. Usher et Priestley pensent que le premier produit de l'assimilation pourrait être, non pas l'aldéhyde, mais l'acide formique. Pour Baur, ce serait l'acide oxalique : il a pu, en effet, réduire au soleil l'acide carbonique à l'état d'acide oxalique et, de celui-ci, on passe facilement à l'acide formique. Ces recherches sont difficiles, et il se passera sans doute longtemps avant qu'on arrive à une certitude.

vent contrôlée pour qu'on puisse y insister davantage, et la question n'est pas résolue.

J'hésite à dire que nous savons *encore moins* comment, dans un deuxième stade de l'assimilation, les sucres se transforment en amidon et en cellulose. A part le doublement du glucose $C^6H^{12}O^6$ en maltose $C^{12}H^{22}O^{11}$ [1] ; à part le passage, réalisé par M. Eschalier dans l'opération industrielle du sthénosage, d'une cellulose presque soluble dans l'eau, et par suite un peu voisine de l'amidon, à une cellulose insoluble, et ceci par l'action de cette même aldéhyde formique, les phénomènes de condensation nous échappent complètement. La chimie de l'assimilation chlorophyllienne, en ce qui concerne le carbone, est donc encore presque complètement à faire.

Il en est de même en ce qui concerne l'azote. Comment se fixe l'azote, quel est le premier composé azoté formé, et quel est le premier qui soit saisissable ? L'un des premiers, semble-t-il, est l'asparagine $C^4H^8N^2O^3$; ce composé, relativement assez simple, est extrêmement répandu chez les végétaux. Il est, d'autre part, l'une des pierres dont est construite la molécule azotée qui forme le protoplasma de la cellule, et Grimaux a pu, en compliquant sa molécule, ou plutôt celle d'un composé voisin, l'acide aspartique, obtenir des corps assez semblables, par plusieurs de leurs propriétés, aux corps albuminoïdes. Mais il semble trop complexe pour ne pas être précédé

1. Assez mal effectué par une diastase, la maltase.

par un autre, plus simple, qui pourrait être l'hydroxylamine NH^3O ou l'acide cyanhydrique CNH. Il suffit bien d'indiquer ces possibilités, qui ne sont même pas des probabilités ; il sera temps de les considérer plus en détail quand, dans vingt, cinquante ou cent ans, elles ou d'autres seront devenues des certitudes.

Nous allons passer maintenant du domaine de la chimie pure dans celui de la chimie appliquée en examinant ce que j'appellerai l'*avenir de la chlorophylle*.

Que fait la fonction chlorophyllienne ? Elle crée, sous l'influence des rayons solaires, de l'amidon, des sucres, de la cellulose, des matières azotées ; elle crée de la nourriture ou du combustible en absorbant de l'énergie. Y a-t-il maintenant, y aura-t-il toujours intérêt à la conserver ? Ne pourrions-nous pas utiliser *directement* les rayons solaires, transformer leur énergie en produits utiles ? Est-il permis de prévoir une époque où la fonction chlorophyllienne sera une fonction d'agrément, dont le seul rôle sera de nous créer des parterres et des jardins ?

Tout, ici, est une question de rendement et de prix de revient. Nous pouvons incontestablement prendre le carbone du calcaire, et, avec une dépense d'énergie, lui ajouter de l'eau et en faire un sucre, identique à un sucre naturel, comestible et assimilable. Seulement, le prix de revient de ce sucre serait tel qu'il n'y faut pas songer ; nos procédés actuels ont un mauvais rendement. Il faudrait les améliorer jusqu'à ce

que le rendement devienne au moins égal à celui de la fonction chlorophyllienne.

Ce dernier est assez facile à évaluer, au moins en gros. Comme il est très variable d'une culture à l'autre, il n'est pas nécessaire de le calculer avec précision, et les approximations que nous devrons faire ne changeront pas l'ordre de grandeur du résultat, qui seul nous importe. On le déduit de la comparaison de la quantité de chaleur reçue du soleil pendant un an (une période de végétation) avec celle que l'on retrouverait en brûlant les produits formés dans le même temps. Je ferai le calcul pour la région parisienne, car les nombres sont assez différents d'un point de la terre à un autre.

En moyenne, 1 centimètre carré exposé normalement aux rayons solaires, à midi et en été, reçoit une calorie et demie par minute. Si, pendant toute l'année, ces rayons continuaient à arriver normalement sur cette surface, la quantité de chaleur reçue en une année, de 526.000 minutes environ, serait de 790.000 calories. Mais les nuits durent, en moyenne, autant que les jours ; les rayons solaires sont obliques et tombent sous un angle variable avec l'heure et avec le jour ; le calcul montre que, pour tenir compte de ces deux causes, il faut abaisser le chiffre à environ 170.000. L'absorption par l'atmosphère le diminue encore, mais comme elle est surtout forte pour les rayons obliques du matin et du soir, ou pour les rayons d'hiver, qui entrent pour peu de chose dans le total, la diminution est peu importante et ne dépasse proba-

blement pas $\frac{1}{5}$, ce qui nous ramène à 140.000. Enfin, il ne fait pas beau tous les jours, et, autant qu'on peut parler de moyenne quand il s'agit d'un phénomène aussi variable, le soleil ne brille en moyenne que pendant moins d'une heure sur deux. Comme, ici aussi, il est surtout voilé en hiver, à un moment où ses rayons ont peu de force : comme, d'autre part, même lorsqu'il est caché, il envoie au sol une quantité considérable de lumière diffuse, on peut admettre finalement que chaque centimètre carré de la surface du sol reçoit 100.000 calories par an. Un hectare de sol agricole recevra donc 10^{10} calories ; il s'agit ici, bien entendu, de petites calories ou calories-grammes.

Cherchons maintenant à évaluer ce que nous retrouvons. Les résultats sont très variables, suivant le genre de culture considéré : aussi faudra-t-il faire le calcul pour les diverses cultures les plus usuelles. Pour le froment, par exemple, un rendement de 4.000 kilos de grain et 8.000 de paille serait excellent. L'avoine donnerait des chiffres du même ordre. Dans les deux cas, en tenant compte de l'humidité et des éléments minéraux, nous obtiendrions environ 10.000 kilos de substance hydrocarbonée combustible.

Les pommes de terre, les betteraves, les navets, peuvent donner de 40.000 à 60.000 kilos à l'hectare, et, en tenant compte des feuilles, jusqu'à 80.000 ; mais il y a dans cet énorme tas beaucoup plus d'eau que d'autre chose, et, en le desséchant, nous le réduirons à 15.000. Une reduc-

tion encore plus forte doit être appliquée au chou, au maïs, à l'oseille, qui donnent jusqu'à 100.000 kilos, réduits à moins de 15.000 par la dessiccation. La luzerne donne 10.000 kilos ; le foin, dans de très bonnes conditions et avec un arrosage intensif, jusqu'à 100.000 ; mais il s'agit alors de foin très aqueux contenant environ 15 p. 100 de substance sèche, ce qui nous ramène toujours au même chiffre[1]. Enfin, les forêts donnent des résultats bien inférieurs ; pour l'ensemble des forêts gérées par l'Etat, la production ligneuse est, en effet, inférieure à 4.000 kilos par hectare, même en comptant les plus petites branches et les feuilles mortes. On ne doublerait certainement pas ce chiffre en tenant compte des racines. Ainsi, dans les meilleures conditions et avec les meilleures cultures, nous n'obtenons pas plus de 15.000 kilos de combustible à l'hectare.

La chaleur de combustion des différents produits est variable de l'un à l'autre ; 5.500 calories par gramme pour les albuminoïdes, 4.200 pour l'amidon et la cellulose, de 9.000 à 10.000

1. Pour le climat parisien. Plus au Midi, et notamment en Italie, les rendements sont de beaucoup supérieurs. Mais la quantité de rayons solaires est aussi plus grande. Dans les contrées tropicales, la quantité de carbone assimilée est beaucoup plus forte ; ainsi, d'après Humboldt et Boussingault, un hectare de terrain en Colombie, planté de bananiers, donne jusqu'à 200.000 kilos de bananes à l'hectare (45.000 kilos de substance sèche), plus une quantité probablement bien supérieure de tiges et de feuilles. Le rendement est ainsi 5 ou 6 fois plus grand que sous nos latitudes, quoiqu'il ne s'agisse nullement de bananiers améliorés. A l'effet, assez faible, d'une plus grande durée d'insolation s'ajoute l'influence de l'humidité et de la température.

pour les corps gras. En tenant compte des proportions relatives dans lesquelles ils se trouvent dans les produits végétaux, on peut admettre, pour la matière végétale sèche, le chiffre 5.000 ; 15.000 kilos (la production d'un hectare) donneront donc 75.10^9 calories. Pour apprécier le rendement de l'assimilation chlorophyllienne, il faut diviser ce nombre par la quantité de chaleur reçue :

$$\frac{75.10^9}{10^{13}} = 0.0075$$

La chlorophylle ne nous retient donc que *moins de un pour cent* de l'énergie qu'elle reçoit. En admettant que l'amélioration continue des cultures puisse donner de meilleurs résultats, il ne semble cependant pas que de bientôt l'ordre de grandeur doive en être changé[1] ; ce rendement est, et restera longtemps très mauvais.

Est-il possible de faire mieux, d'obtenir, sans l'intermédiaire des plantes, les mêmes produits avec un meilleur rendement de l'énergie ? Pas encore, et même il s'en faut de beaucoup[2]. Mais nous en connaissons la raison, et cette raison est de nature à nous donner confiance pour l'avenir.

C'est que les produits végétaux, si simples en apparence, sont, en réalité, au point de vue chimique, des corps de structure très compliquée.

1. Un rendement de 100 p. 100 correspondrait, pour les pommes de terre par exemple, à une récolte de 750 kilogrammes par mètre carré, soit une couche continue de plus de 1 mètre d'épaisseur.

2. Dans les expériences de Loew et de Fischer, il fallait pour obtenir un gramme de lévulose plus de 300 grammes d'aldéhyde formique.

Pour former la molécule du sucre de cannes $C^{12}H^{22}O^{11}$, il ne faut pas moins de 45 atomes de carbone, d'hydrogène, d'oxygène, et il faut que chacun de ces atomes soit à sa place, sans quoi, au lieu de sucre, nous obtiendrions un corps absolument différent. Pour former l'amidon, ou la cellulose, il faut un nombre d'atomes beaucoup plus considérable encore ; pour l'albumine, plus que pour l'amidon, des milliers peut-être. Or, la synthèse industrielle doit nécessairement prendre ses éléments là où ils sont le meilleur marché, c'est-à-dire dans la nature minérale ; et il se trouve que, à de rares exceptions près, ces éléments ne sont abondants que dans des composés très simples, sinon même à l'état libre, comme il arrive pour l'azote. L'oxygène existe à l'état libre dans l'air, à l'état d'oxydes très simples dans les minéraux ou dans l'eau : le carbone, principalement à l'état d'acide carbonique dans la pierre calcaire ou dans l'air [1]. Or, la synthèse peut difficilement obtenir du premier coup une molécule à 45 atomes en partant de molécules beaucoup plus petites à 3 ou 4 atomes seulement. Elle opère graduellement, en passant par

1. Les pétroles cependant sont des composés carbonés fort complexes. Ils le sont même trop. En effet, au point de vue de la synthèse, il n'y a probablement aucun intérêt à dépasser les carbures en C^6 ; et les carbures à moins de 6 atomes de carbone ne forment qu'une très faible partie des pétroles (généralement moins de 1 p. 100), le reste étant formé de corps plus condensés. La houille est dans le même cas. Elle est d'ailleurs, comme le pétrole, en quantité limitée : l'extraction annuelle est d'environ un milliard de tonnes, alors que l'assimilation chlorophyllienne porte tous les ans sur 100 milliards de tonnes de produits.

l'intermédiaire de composés de plus en plus complexes. Chaque opération est imparfaite, car les réactions ne sont jamais totales, et, à côté du produit cherché, il s'en forme d'autres, souvent en beaucoup plus grande proportion, toujours en proportion comparable, et qu'on ne peut utiliser ; si donc le nombre des opérations est grand, la perte de matière devient énorme et les rendements tombent à presque rien [1].

Le chimiste reprend l'avantage sur la nature, quand il s'agit de produire des corps moins complexes que le sucre ou l'amidon. C'est ainsi que le prix de revient du carbure de calcium, produit synthétique, s'approche de 100 francs la tonne ; il suit de là que le prix de revient de l'acétylène, premier carbure synthétique, est voisin de 250 francs la tonne. Comme l'acétylène, par addition d'hydrogène et d'eau, peut donner de l'alcool (transformation aisément réalisable au laboratoire : 1.000 kilos de carbure de calcium peuvent donner théoriquement 400 kilos d'acétylène et 850 litres d'alcool), on voit qu'il est possible d'arriver par cette voie à un alcool synthétique meilleur marché que l'alcool naturel [2]. Il n'est pas nécessaire de multiplier ces exemples ; ce que la chimie est sur le point de faire pour des composés simples, elle le fera plus tard, par des

1. Ceci n'empêche pas que le problème *scientifique* de la synthèse ne soit résolu ; mais le problème industriel, tout différent, est bien loin de l'être.

2. Celui-ci se vend autour de 40 francs l'hectolitre. La transformation industrielle de l'acétylène en alcool a déjà été étudiée : on y arrivera nécessairement.

procédés meilleurs, pour d'autres plus complexes, et remportera probablement plus d'une victoire sur la chlorophylle.

On m'objectera que celle-ci peut se défendre ; et, en effet, les espèces végétales sont perfectibles, les rendements agricoles vont sans cesse en croissant ; on peut découvrir de nouvelles variétés, des arbres poussant plus vite ; mais l'amélioration ne peut être indéfinie, car ce n'est pas par la faute de la chlorophylle que les rendements sont aussi mauvais, et il faut dire, à sa décharge, qu'elle travaille avec de mauvais outils. Elle est chargée d'assimiler l'acide carbonique dans l'air ; or, celui-ci en contient extrêmement peu. Dans mille litres d'air, il n'y a pas un tiers de litre d'acide carbonique, alors qu'il y a souvent vingt litres de vapeur d'eau, de telle sorte que la plante qui doit s'en nourrir est dans la même situation que le voyageur qui devrait boire l'eau dissoute dans le vent du Sahara. La feuille fait tout ce qu'elle peut, car elle absorbe l'acide carbonique presque aussi énergiquement qu'une lessive de soude ; elle en absorbe davantage si on lui en offre davantage, et, dans une atmosphère artificiellement enrichie, elle en assimile parfois une quantité telle qu'elle se gonfle d'amidon. Si le reste de la plante pouvait s'accommoder de ce régime de gavage, on pourrait espérer augmenter la récolte en la plaçant dans un milieu plus riche en acide carbonique ; malheureusement, il n'en est pas généralement ainsi. Les choses sont ainsi réglées que les végétaux n'ont presque rien à manger et que, lorsqu'on leur donne

davantage, ils ne le digèrent pas. Peut-être cette situation changera-t-elle un jour, et il faut même le souhaiter ; sur ce point, la parole n'est pas au chimiste, mais à l'agriculteur.

Je terminerai par une remarque : Dans tout ce processus de l'assimilation chlorophyllienne, *nous ignorons le rôle de la chlorophylle.*

CHAPITRE V

LES DIASTASES

Une bactérie ou une levure, c'est-à-dire un être vivant de très petites dimensions et de fonctions relativement simples, placé dans un liquide nutritif convenable, ne tarde pas à se reproduire : c'est-à-dire qu'après un certain temps, quelques heures ou quelques jours, le liquide contient, à la place d'une seule bactérie, un nombre considérable de bactéries presque absolument identiques à la première. Nous concevons ces bactéries comme formées par les réactions chimiques des substances primitivement contenues dans le corps de la première, entre elles d'une part, et d'autre part sur les composés dissous dans le liquide nutritif. Par suite de ces réactions, la quantité de ces substances premières a augmenté considérablement, car chacune de celles qui existaient dans le corps de la bactérie mère se retrouve, en quantité pratiquement égale, dans le corps de chacune des bactéries filles : si celles-ci sont au nombre de cent, chaque substance est multipliée par cent.

Ainsi, par le jeu des forces chimiques, toutes les substances qui formaient le corps de la bac-

térie primitive augmentent en quantité. Naturellement, ceci n'est pas une propriété spéciale aux microorganismes : c'est une propriété commune à tous les êtres vivants. On peut concevoir que toute une forêt de chênes provienne d'un seul gland : on peut concevoir que l'humanité tout entière provienne d'un seul homme et d'une seule femme. Les millions de lapins qui ont rongé l'Australie descendaient probablement d'un nombre très petit de lapins : toutes les pommes de terre européennes proviennent d'un très petit nombre de pommes de terre, d'acide carbonique, de lumière solaire et d'eau.

Cette faculté de reproduction de soi-même est une propriété très caractéristique de la matière vivante. Supposons qu'un microorganisme, au lieu d'être ce qu'il est, soit formé de composés chimiques de synthèse, tels que nous savons les produire : il ne pourra que disparaître, parce que dans toute réaction chimique proprement dite les corps réagissants se détruisent pour former des composés nouveaux. Même en supposant qu'il ne disparaisse pas — ce qui arrivera si tous ces composés nouveaux sont insolubles — il arrivera bientôt à un état stable, car la réaction s'arrêtera dès qu'elle sera complète. Un morceau de carbonate de chaux, mis dans l'acide sulfurique, se transformera lentement : mais la transformation s'arrêtera dès qu'il sera changé en sulfate, quelle que soit la quantité d'acide sulfurique qu'on mette à sa disposition; tandis qu'une bactérie, dans un milieu approprié et suffisamment abondant, se multipliera indéfiniment.

Il est vrai que peut-être l'exemple d'un fragment de carbonate de chaux est trop simple, et qu'on pourrait imaginer un mélange tel, que chacun des corps présents donne, en se transformant, l'un des autres. Mais alors, au point de vue chimique, on aboutit à une absurdité : car si toutes les substances se transforment circulairement les unes dans les autres, autant dire qu'il n'y a pas eu de réaction du tout, puisque nous retrouvons à la fin tout ce que nous avions au commencement.

Cette multiplication spontanée de la matière vivante est un phénomène très complexe ; autant qu'on peut le savoir, il dépend de proportions très exactes entre les différents composés dont est formée la cellule. Il est pour le moment inutile de chercher à le comprendre : seuls les philosophes ont sur ces problèmes des lumières que les savants ne leur envient pas. Tout ce que nous pouvons faire, c'est de l'analyser, de le décomposer, d'en extraire quelque chose de plus simple qui puisse nous aider à comprendre le reste. Or nous n'avons le choix qu'entre deux hypothèses: ou bien chaque substance se reproduit elle-même, directement, à partir de l'aliment; ou bien, chaque substance est le produit de l'action des autres sur les aliments. Dans les deux cas, nous sommes ramenés à des réactions telles que l'une au moins des substances qui y prennent part ne se détruit pas, contrairement à ce qui se passe dans le cas des réactions ordinaires telles que les doubles décompositions. Il doit donc exister des substances qui ne se détruisent pas en agissant.

Il en existe, en effet, un grand nombre, que l'on a retirées des cellules vivantes, et auxquelles on a donné le nom général de *diastases*. Certains auteurs, on ne sait pourquoi, ont éprouvé le besoin de changer ce nom en celui d'*enzymes*, peut-être parce qu'il est plus généralement employé à l'étranger : ceci ne saurait être une raison suffisante, puisque la première de ces substances, pour laquelle le nom de diastase a été créé, a été découverte par des chimistes français.

Son nom ne lui a pas été maintenu : des nécessités de classification l'ont fait, maintenant qu'elle n'est plus la seule, appeler *Amylase*. Sa découverte (Dubrunfaut, 1823 ; Payen et Persoz, 1832) est née du désir de comprendre l'une des phases de la fabrication de la bière, le maltage. La bière est, comme on sait, principalement composée d'une décoction d'orge : le grain d'orge, abandonné à lui-même, à une douce chaleur et dans une atmosphère humide, germe, et l'amidon qu'il contient en grande quantité se transforme en même temps en *maltose*, sucre voisin du sucre de cannes, que dans une deuxième phase de la fabrication la levure fera fermenter. Cette transformation de l'amidon en maltose se fait sous l'influence de l'amylase que contient le grain, et qu'on peut extraire de l'orge germée en en faisant une infusion qu'on précipite par l'alcool.

La substance ainsi obtenue possède bien la propriété que nous cherchons, d'agir sans se détruire. On en a la preuve en constatant la disproportion énorme qui existe entre le poids de diastase et le poids de matière qu'elle transforme.

Payen et Persoz ont obtenu une diastase qui pouvait transformer en sucre 2.000 fois son poids d'amidon ; depuis, ce résultat a été dépassé, et cependant, on ne connaît la diastase que sous forme de mélange avec des matières étrangères qui pèsent et n'agissent pas : l'activité d'une amylase pure serait encore bien supérieure. Telle qu'elle est, elle suffit à montrer que la diastase agit différemment d'un réactif chimique ordinaire, et à l'inverse de ce réactif ne se détruit pas dans la réaction qu'elle provoque ; car celle-ci est une simple hydratation, dans laquelle 162 grammes d'amidon fixent 9 grammes d'eau :

$$2\,C^6H^{10}O^5 + H^2O = C^{12}H^{22}O^{11}$$

et par suite un gramme d'amylase, agissant sur 2.000 grammes d'amidon, fixe sur eux 110 grammes d'eau. S'il s'agissait d'une réaction chimique ordinaire, c'est-à-dire d'une double décomposition entre deux corps, telle que celle par laquelle l'alcool fixe de l'eau sur l'acide sulfurique en se transformant en éthylène

$$C^2H^6O + SO^4H^2 = C^2H^4 + SO^4H^2.H^2O$$

la quantité d'eau que pourrait fournir l'amylase serait égale, au plus, à celle qu'elle contient, de même que l'alcool ne peut pas fournir plus d'eau qu'il n'en contient virtuellement : elle serait donc certainement inférieure au poids de cette diastase, inférieure à 1 gramme au lieu d'être 100 fois plus considérable. Cette eau, fixée sur l'amidon, est nécessairement prise au milieu

extérieur, à l'eau dans laquelle on a dissous l'amylase : celle-ci combine l'eau et l'amidon, qui sans elle ne réagissent pas l'un sur l'autre, en restant elle-même inaltérée. C'est la définition même des actions que nous recherchons.

Cette disproportion entre le poids de la diastase et le poids de la matière transformée est un fait très général : c'est ainsi qu'une autre diastase, la *sucrase*, qui hydrolyse le sucre ordinaire, peut agir, d'après O'Sullivan et Tompson, sur 100.000 fois son poids de sucre ; ou que la présure peut coaguler, dans le lait, un poids de caséine 250.000 fois supérieur au sien. Il faut bien remarquer, cependant, que cette disproportion (qui est rarement aussi grande) ne suffit pas *à elle seule* à affirmer la nature diastasique d'une réaction. Ainsi, quand l'hydrogène réduit l'oxyde vert d'uranium

$$U^3O^4 + H^2 = 3UO + H^2O$$

un gramme d'hydrogène réagit sur 392 grammes d'oxyde. Dans la réaction

$$2CI^4 + H^2 = C^2I^6 + 2HI$$

les proportions sont de 1 à 520, et on pourrait certainement trouver des phénomènes chimiques tels qu'elles soient plus différentes encore. Remarquons toutefois que nous n'arrivons à des rapports aussi considérables que parce que nous faisons réagir l'hydrogène, de poids atomique 1, sur des composés à molécules très lourdes : de pareilles disproportions ne se présentent pour ainsi dire jamais dans la pratique. Cependant,

elles ne sont pas logiquement impossibles, et la démonstration rigoureuse de la nature diastasique du corps que l'on étudie ne peut être faite que lorsqu'on peut écrire la formule de la réaction, comme nous pouvons le faire pour l'amylase. Si cela est possible dans beaucoup de cas, il en existe cependant dans lesquels nous ne savons pas en quoi consiste la réaction, par exemple lorsqu'il s'agit de l'action de la présure sur la caséine, et malgré la disproportion énorme de 1 de présure à 250.000 de caséine transformée, nous n'avons pas la preuve qu'il ne s'agit pas d'une réaction chimique ordinaire. On connaît de telles réactions (l'action d'un alcali sur le chlorure ferrique très basique en est une) dans lesquelles un gramme de substance agit *chimiquement*, par double décomposition, sur 3.000 grammes d'une autre substance en la rendant insoluble. Dans tous les cas pareils, il faut invoquer d'autres raisons avant de conclure qu'on se trouve bien en présence d'une véritable diastase.

Si les diastases agissent bien par leur seule présence, et sans se détruire, dans le sens le plus rigoureux des mots, elles doivent pouvoir transformer une quantité illimitée de matière. Au contraire, on constate très généralement qu'une diastase, après qu'elle a agi, a perdu une partie de son activité. On ne doit donc pas considérer comme absolument exact ce qui vient d'être dit au sujet de la non-destruction de la diastase dans les phénomènes qu'elle provoque: en réalité il y

a destruction partielle, mais cette destruction est tellement lente et insignifiante vis-à-vis de l'effet produit, que nous pouvons, pour le moment, la négliger entièrement. Nous la considérerons, momentanément du moins, comme un phénomène accessoire, sans nous dissimuler d'ailleurs que nous ne faisons qu'esquiver la difficulté et que toute théorie de l'action des diastases devra la résoudre entièrement.

Il n'est pas impossible que cette difficulté disparaisse d'elle-même : peut-être le phénomène est-il dû simplement à ce que nos diastases, isolées de matières vivantes ou ayant vécu, sont impures. Elles ne sont ni cristallisables, ni volatiles, c'est-à-dire que les procédés de purification généralement employés échouent sur elles. On ne connaît guère d'autre moyen pour les isoler, que de les précipiter de leur solution dans l'eau par une addition d'alcool, et elles entraînent alors beaucoup d'impuretés. On ne peut même pas dire qu'on les a *isolées*, mais seulement qu'on les a *concentrées* dans le produit auquel on arrive, et dans lequel elles se trouvent mélangées à beaucoup d'autres substances d'origine vitale. Il n'est pas surprenant que ce mélange (qui n'est, somme toute, qu'une sorte de protoplasma modifié) ait conservé une partie des propriétés de la cellule vivante, par exemple celle de vieillir, c'est-à-dire de s'user en agissant, et le vieillissement peut aussi bien être dû aux matières étrangères qu'à la diastase véritable, dont la puissance, dans cette hypothèse, serait encore de beaucoup supérieure à ce que nous croyons. Même si elle ne se

détruit pas du tout dans la réaction qu'elle provoque, il n'est pas sûr que les substances qui l'accompagnent n'y interviendront pas, et ne se transformeront pas en quelque produit nouveau qui lui porte atteinte.

Il est certain, en tout cas, que les diastases retiennent quelque chose de leur origine vitale. On s'en aperçoit, par exemple, quand on les soumet à des variations de température. Une des propriétés essentielles des êtres vivants est de ne pouvoir supporter que des températures comprises entre certaines limites, très variables d'une espèce à l'autre, mais souvent très resserrées. La résistance à la chaleur est, le plus souvent, bien moindre que la résistance au froid : les bactéries, dont un assez grand nombre supportent sans aucun dommage la température de — 200°, périssent presque toutes dans l'eau bouillante, et il n'en est aucune qui supporte une température de 20° supérieure. Beaucoup plus sensibles, les levures de bière périssent entre 50° et 65°, et si on les échauffe graduellement, on constate qu'avant de mourir elles perdent graduellement aussi leur activité, c'est-à-dire leur pouvoir de provoquer des fermentations : car celles-ci deviennent très pénibles à 45° et s'arrêtent à peu près complètement à 50°. Le même fait se produit du côté des basses températures : ensemencée dans un moût sucré très froid, la levure y demeure inactive et n'y produit presque pas d'alcool, sans cependant être morte, car elle recommence immédiatement à travailler si on la réchauffe. Ainsi nous voyons que son activité,

qui est très faible à 0°, augmente quand la température s'élève, passe par un maximum, puis décroît et redevient sensiblement nulle vers 45°. Or, cette loi de variation distingue très nettement la matière vivante d'un système chimique ordinaire, car, d'une façon très générale, l'intensité des phénomènes chimiques augmente avec la température, quelle que soit cette température [1]. Le zinc se dissout dans l'acide sulfurique, ou la craie dans l'acide chlorhydrique, d'autant plus vite que l'acide est plus chaud, et la vitesse ne cesse d'augmenter jusqu'à la température de l'ébullition. Le chlorate de potasse se décompose en chlorure de potassium et oxygène, ou le nitrate d'ammoniaque en protoxyde d'azote et en eau, d'autant plus vite qu'on le chauffe davantage, sans qu'il y ait une température optima. L'existence de cette température sépare assez exactement les actions vitales des actions chimiques proprement dites.

Je disais que les diastases retiennent quelque chose de leur origine vitale ; elles retiennent, tout au moins, cette propriété de la température optima. A 0°, la plupart d'entre elles ont une action extrêmement lente : cette action croît quand la température s'élève, passe par un maximum, décroît extrêmement vite et s'annule

1. Il peut y avoir des exceptions : quand, par exemple, l'un des produits de la réaction se décompose à une certaine température, il est bien évident que la rapidité avec laquelle ce corps se forme n'augmente plus à cette température. La baryte fixe l'oxygène d'autant plus vite qu'elle est chauffée plus fort, à condition qu'on n'approche pas du point de décomposition du bioxyde de baryum.

à une température un peu plus élevée. Si l'on continue à chauffer, quelques degrés plus haut, la diastase est *tuée* : elle ne reprend plus son activité, même dans le liquide refroidi, de même qu'une cellule de levure, ou une plante, ou un animal quelconque tué par la chaleur ne ressuscite pas par le froid.

Ainsi, l'activité de la sucrase, diastase qui hydrolyse le sucre de cannes et le transforme en sucre interverti (mélange de glucose et de lévulose) est la suivante à diverses températures :

à 0°	6
20°	25
30°	40
40°	70
50°	100
60°	70
65°	7
70°	0

Si on ne dépasse pas la température de 70°, la sucrase refroidie peut encore intervertir le sucre, quoiqu'elle ait perdu la plus grande partie de son activité ; mais à 75° elle est tuée définitivement. Ces propriétés, on le voit, la rapprochent d'une matière vivante et l'éloignent des réactifs chimiques.

Ce n'est pas tout, et elle s'en rapproche encore par l'influence qu'a sur elle le temps pendant lequel on la chauffe. Un chauffage prolongé l'altère beaucoup plus qu'un chauffage de courte durée au même degré de température. Il n'y a pas, à proprement parler, de température mortelle : il y a *des* températures qui peuvent

devenir mortelles si on les prolonge assez longtemps. Or, il en est de même pour les microbes, dont beaucoup, par exemple, supportent quelques instants la température de l'eau bouillante, qui seraient tués s'ils y séjournaient plus longtemps.

Toutes les diastases ont, comme la sucrase, une température optima et une température mortelle. Elles ne sont pas les mêmes pour toutes, mais il n'y a pas d'énormes différences, et, en général, la température de 75-80° leur est rapidement funeste (l'amylase, cependant, dont nous allons parler tout à l'heure, est encore très active à 75°). Comme les cellules d'où sont extraites ces diastases sont tuées par des températures bien inférieures — la sucrase, par exemple, détruite à 75°, provient de la levure, qui supporte difficilement 60°, — on voit que les diastases n'ont retenu qu'en partie la sensibilité de ces cellules à la chaleur. Elles conservent quelque chose de leur origine vitale, elles ne conservent pas tout ; et, ici encore, il y a des raisons de croire que ce qui leur en reste est dû, au moins en partie, aux impuretés qui les accompagnent, et dont nous ne savons pas bien les séparer.

J'ai donné les raisons pour lesquelles on peut penser que la plupart des fonctions des êtres vivants s'exercent par l'intermédiaire de diastases. Il est certain que notre connaissance de ces êtres serait beaucoup plus complète si nous pouvions décomposer leur vie en fonctions, et, prenant l'une après l'autre chaque fonction, iso-

ler la diastase qui lui correspond. Nous aurions ainsi ramené un problème extrêmement compliqué à un certain nombre de problèmes plus simples et pouvant être traités par la même méthode : ramené, si l'on veut, une équation du trentième degré à trente équations du premier degré.

Ce travail est commencé depuis très longtemps, puisque la première diastase, l'*amylase*, prévue par Dubrunfaut vers 1830, a été isolée par Payen et Persoz en 1832 : il a continué depuis, et l'on connaît actuellement une quarantaine de diastases nettement caractérisées, dont la plupart sont en relation avec des propriétés très importantes de la cellule. Je ne signalerai que les principales, et encore très rapidement, car ce qu'on sait sur elles est, somme toute, fort peu de chose à côté de ce qu'on voudrait savoir.

Un premier groupe sera constitué par les diastases de distillerie. L'*amylase* transforme, par hydrolyse, l'amidon en dextrines : la *dextrinase*, dont on admet l'existence sans avoir pu la séparer exactement de la précédente, prend les dextrines ainsi produites et en fait du maltose. Sous l'influence de ces deux diastases, l'empois d'amidon est liquéfié, c'est-à-dire qu'il devient, de trouble et pâteux, presque transparent et fluide comme de l'eau : cette liquéfaction est, pour ainsi dire, le réactif de ces deux diastases. La *maltase* enfin dédouble, toujours par hydrolyse, une molécule de maltose $C^{12}H^{22}O^{11}$ en deux molécules de glucose $C^{6}H^{12}O^{6}$. Comme ce dernier, soumis à la fermentation, donne l'alcool, on pressent que ces

trois diastases doivent avoir une grande importance pour les industries de l'alcool. En effet, la fabrication de la bière, de l'alcool de grains ou de pommes de terre, reposent exclusivement sur les propriétés de ces diastases.

Elles sont, d'ailleurs, très répandues, à la fois chez les plantes et chez les animaux. L'amylase existe dans une foule de produits, tels que les graines, les feuilles, les jeunes pousses : elle existe aussi dans les pommes de terre, et, probablement, partout où il existe une réserve d'amidon. Son rôle paraît être, en effet, de liquéfier et de remettre en circulation cette réserve, au moment où la plante en a besoin pour constituer ses tissus, et où (s'il s'agit par exemple d'une graine qui germe) n'ayant pas de racines absorbantes ni de chlorophylle qui assimile, elle doit trouver en elle-même sa propre nourriture. L'amylase joue aussi un rôle très important dans la digestion des animaux ; c'est grâce à elle et à ses deux compagnes que devient soluble et assimilable l'amidon des farines, des graines ou des feuilles dont ils font leur nourriture. Elle est sécrétée par les glandes digestives, notamment par le pancréas, ou par les innombrables microbes qui pullulent dans le tube digestif et qui, eux aussi, liquéfient l'amidon et le transforment, soit en maltose, soit directement en glucose.

Nous connaissons encore d'autres diastases digestives. Notre alimentation, si compliquée qu'elle paraisse, est au fond très simple, puisqu'elle se réduit à trois aliments seulement, ou à

trois classes d'aliments très uniformes dans chaque classe : les corps hydrocarbonés (amidon, sucre) ; les corps azotés (caséine du lait, albuminoïdes des légumes ou de la viande) et les corps gras (huiles végétales, graisses animales). A chacun de ces groupes correspondent des diastases particulières : le premier a, comme nous venons de le voir, l'amylase et ses deux aides ; le second a la *pepsine*, secrétée par la muqueuse de l'estomac, et les diverses diastases du pancréas, parmi lesquelles la *trypsine* ; le troisième a la *lipase*.

Toutes ces diastases digestives ont un caractère commun : ce sont, dans les conditions normales, des diastases dédoublantes qui simplifient la molécule des corps sur lesquels elles agissent, en les décomposant en d'autres plus simples et plus solubles. Le glucose est plus simple que le maltose et la dextrine plus que l'amidon : de même les *peptones*, qui résultent de l'action de la pepsine sur les aliments azotés, sont plus simples par leur molécule que ces aliments. De même encore la glycérine et les acides gras, que la lipase forme en agissant sur les graisses ou sur les huiles, sont séparément plus simples que ces corps gras.

Nous verrons plus tard que cette simplification de la molécule a pour but de permettre l'absorption des aliments, c'est-à-dire leur passage de l'intérieur du tube digestif à l'extérieur, dans l'organisme. Les parois de l'estomac et de l'intestin sont ainsi faites, qu'elles s'opposent absolument au passage de l'aliment non digéré, c'est-à-dire *non simplifié*. En l'absence des diastases

que secrète le tube digestif ou de celles, plus actives encore, que secrètent les microbes partout répandus dans la masse alimentaire, celle-ci ne serait pas absorbée et la nutrition ne se ferait pas. Le glycogène du foie provient peut-être de l'amidon des aliments (il a, en tout cas, la même composition) : la fibrine des muscles qui se forment chez un nouveau-né provient nécessairement de la caséine du lait maternel, puisqu'il n'y a pas d'autre aliment azoté : mais il faut d'abord que cet amidon ou cette caséine soient pour ainsi dire *pulvérisés* à l'état de molécules beaucoup plus simples. Ce travail se fait dans l'estomac et dans l'intestin : les substances ainsi élaborées traversent les parois du tube digestif, imperméables à l'aliment brut, arrivent dans la circulation, sont reprises (on le pense du moins) par d'autres diastases qui, agissant en sens inverse des premières, refont à leur manière ce que celles-ci avaient détruit. C'est grâce à ce double travail que chacun de nous, ou du moins chaque espèce, conserve son individualité et ne devient pas, suivant ce qu'il mange, un mouton ou un bœuf. Je n'y insiste pas davantage, car ces diastases de reconstruction ne sont pas connues, et la question restera, tant qu'elles ne le seront pas, du domaine de la physiologie beaucoup plus que de celui de la chimie. Je dirai simplement qu'on admet que, comme pour l'amylase et la maltase, les autres diastases dédoublantes, pepsine et trypsine, agissent par hydrolyse.

Un autre groupe de diastases très intéressantes

est celui des *oxydases* ou diastases oxydantes. Ici ce n'est plus à la digestion que nous avons affaire, mais à une autre fonction tout aussi importante, celle de la respiration. On sait que les plantes, comme les animaux, respirent : c'est-à-dire qu'elles absorbent de l'oxygène et émettent de l'acide carbonique. La respiration est une véritable combustion, très active chez les animaux supérieurs dont elle maintient la température à un degré constant, supérieur à la température de l'air ambiant, et ralentie au contraire chez les animaux à sang froid et chez les végétaux. Chez ces derniers, elle est masquée, pendant le jour, par l'assimilation chlorophyllienne qui agit exactement en sens contraire, décompose l'acide carbonique et met en liberté l'oxygène ; elle redevient sensible pendant la nuit, lorsque le travail de l'assimilation est suspendu.

Au point de vue chimique, la respiration est une oxydation, par l'oxygène libre de l'air, des substances contenues dans les tissus. Cette oxydation porte sur des corps composés d'hydrogène, de carbone, d'azote et d'oxygène : le carbone est brûlé complètement, et éliminé à l'état d'acide carbonique ; l'hydrogène est brûlé complètement aussi, et éliminé à l'état d'eau : quant à l'azote, sa destinée n'est pas aussi simple et les animaux le laissent échapper, suivant l'espèce à laquelle ils appartiennent, à l'état d'urée, CON^2H^4, d'acide urique $C^5H^4N^4O^3$, d'acide hippurique $C^9H^9NO^3$, composés incomplètement brûlés puisqu'ils ne renferment que $\frac{1}{4}$ au plus de l'oxygène

nécessaire à leur combustion complète, mais plus oxygénés cependant que les matières albuminoïdes (chair musculaire) qui n'en contiennent que $\frac{1}{9}$ environ[1].

Comment nous expliquer cette oxydation ? On n'y parvient pas sans difficulté : car aucune des substances que l'on peut retirer des animaux et des plantes (je ne parle ici que des principales) ne se combine à froid à l'oxygène. L'amidon, par exemple, ou le sucre, ou l'alcool, sont inaltérables à l'air à la température ordinaire : ils brûlent cependant, et très rapidement, dans l'organisme. L'albumine et les matières analogues qui forment le protoplasma et la chair musculaire sont également inaltérables à l'air et combustibles dans l'organisme. Si nous ne voulons pas en être réduits à invoquer la force vitale, nous devons trouver une explication chimique de cette anomalie.

Nous arriverons, encore ici, à une solution vraisemblable en ayant recours aux actions de diastases. Il existe, en effet, des diastases oxydantes, qui ont pour fonction de fixer l'oxygène libre sur des corps par eux-mêmes inaltérables ou peu altérables. On leur a donné le nom d'*oxydases*. La première en date est la *laccase*, ainsi nommée parce qu'elle a été retirée de la laque de Chine. On connaît ces plateaux de bois, ornés d'incrustations, qui viennent d'Indo-Chine, de

1. L'urée peut être, pour la plus grande partie, un produit d'hydrolyse. Ce qui suit ne se rapporte qu'à la combustion du carbone, de beaucoup la plus importante.

Chine et du Japon : le fond parfaitement noir, dur et brillant est la laque. C'est un suc végétal, qui, au moment où on l'extrait de la plante, se présente sous la forme d'un liquide crémeux blanc jaunâtre. Abandonné à l'air, surtout en couche très mince, il noircit rapidement en même temps qu'il se dessèche, et, traité convenablement par un ouvrier habile, il recouvre les surfaces d'un vernis noir brillant et inaltérable. L'intervention d'une diastase dans ce phénomène de noircissement, soupçonnée par le chimiste japonais Hikorokuro Yoshida, a été complètement démontrée par G. Bertrand. Le suc de l'arbre à laque contient deux substances principales : le laccol, matière organique ayant quelque analogie avec le phénol, et la laccase, diastase oxydante. Chacun des deux, pris isolément, est inaltérable à l'air ; leur mélange, en l'absence d'oxygène, est encore inaltérable, tandis que, exposé à l'air, il noircit très rapidement en absorbant l'oxygène.

Pour montrer la nature diastasique du phénomène, il faut prouver que la laccase ne se détruit pas en agissant, qu'elle fixe l'oxygène sur la substance oxydable sans perdre rien elle-même et sans rien gagner. Cette démonstration est difficile si l'on se contente d'opérer avec le laccol, dont la constitution est inconnue. Elle est, au contraire, tout à fait aisée si l'on fait agir la diastase sur l'hydroquinone $C^6H^4(OH)^2$, qui donne en s'oxydant une molécule d'eau et une molécule de quinone

$$C^6H^4(OH)^2 + O = C^6H^4O^2 + H^2O$$

car on opère alors sur des substances connues et on sait écrire sans aucun doute la formule de la réaction. Dans une de ses expériences, G. Bertrand a montré que 2 décigrammes de laccase pouvaient fixer sur l'hydroquinone 266 milligrammes d'oxygène, alors qu'ils n'en contenaient eux-mêmes que 95 ; de plus, après l'expérience, la laccase n'était pas détruite et pouvait être précipitée par l'alcool. En même temps, un volume assez considérable d'oxygène libre avait été absorbé : la nature diastasique du phénomène ne fait donc pas de doute.

La laccase agit sur un certain nombre de corps organiques, et, ce qui est le point important pour nous, ses effets, dans certains cas, imitent d'assez près ceux de la respiration. Ainsi, elle agit sur l'acide pyrogallique (ou pyrogallol) en donnant un précipité rouge (purpurogalline), *en même temps qu'il se dégage de l'acide carbonique*. Ce même dégagement s'observe encore avec l'acide gallique ou avec le tannin, et il est quelquefois très abondant, car il arrive que pour 4 volumes d'oxygène absorbé il y a 3 volumes d'acide carbonique éliminé. L'analogie avec les phénomènes de respiration, qui consistent aussi en une absorption d'oxygène et un dégagement d'acide carbonique en volume à peu près égal, est évidente, et c'est ce qui a fait penser que les oxydases pouvaient jouer un rôle important dans ce processus physiologique. L'hydroquinone, le tannin et l'acide gallique sont, en effet, des substances inaltérables à l'air comme les sucres ou l'albumine, et cependant nous voyons que leur

oxydation est rapide en présence d'une faible quantité de laccase. Il est bien tentant de généraliser ces faits et de supposer qu'une oxydase répandue dans tous les tissus y provoque l'oxydation, c'est-à-dire les combustions des principes qui s'y trouvent ; cette supposition étant appuyée d'autre part sur ce fait que la laccase, ou d'autres oxydases, sont très répandues et ont été caractérisées chez un assez grand nombre de végétaux différents.

Cependant, cette hypothèse se heurte immédiatement à une difficulté assez sérieuse. En effet, la laccase agit sur certains corps organiques, et certains seulement, qui présentent une particularité déterminée dans leur structure, tels que l'hydroquinone, le pyrogallol, le tannin, l'acide gallique, le gaïacol. Or, quoique ces composés existent dans la nature, ou soient des dérivés immédiats de corps naturels (le tannin est très répandu dans les écorces tannantes et dans certains bois ; l'acide gallique existe dans plusieurs plantes, résulte du dédoublement du précédent sous l'influence de moisissures et, chauffé, donne le pyrogallol ; l'hydroquinone existe dans les bourgeons du poirier, et, sous forme de combinaison avec le glucose (arbutine) chez quelques végétaux, etc.), ils sont loin d'être assez répandus pour donner une explication suffisante d'une propriété aussi générale que celle de la respiration.

De plus, dans les organismes, les oxydations, au moins en ce qui concerne le carbone, sont complètes ; la totalité du carbone contenu dans

les aliments et assimilé est brûlé, et est éliminé, pour 99 p. 100 sous forme d'acide carbonique, pour 1 p. 100 sous la forme d'urée. Au contraire, les oxydations induites par la laccase sont incomplètes ; l'hydroquinone est transformée en quinone, sans dégagement d'acide carbonique, et l'oxydation s'arrête là ; le tannin, l'acide gallique, sont brûlés en partie seulement ; le pyrogallol, le gaïacol donnent surtout des produits plus complexes qu'eux-mêmes. Si donc la respiration était un phénomène comparable à ceux que nous observons avec la laccase, il devrait se former des produits accessoires ; et comme nous savons qu'aucun de ces produits accessoires n'est éliminé en proportion notable (l'urée ne faisant, comme je le disais, que 1 p. 100), il faudrait conclure qu'ils s'accumulent indéfiniment dans l'organisme, ce qui est absurde. Ainsi une étude plus approfondie de la laccase ne nous encourage pas, bien au contraire, à voir dans la présence de cette diastase la cause générale de la respiration.

Elle n'est pas, il est vrai, la seule diastase oxydante, et, avec d'autres, nous évitons une partie des objections précédentes. Par exemple, la deuxième en date des oxydases, la *tyrosinase*, qui est particulièrement abondante chez certains champignons, oxyde un grand nombre de corps sur lesquels la laccase est sans action ; et certains de ces corps, comme par exemple la *tyrosine* qui lui a donné son nom, sont extrêmement répandus à la fois dans le règne animal et dans le règne végétal. La tyrosinase étant elle-même très ré-

pandue, on évite ainsi la première objection, d'après laquelle la rareté des corps oxydables par la laccase empêchait d'attribuer à cette diastase un rôle général. Malheureusement, on n'échappe pas aussi facilement à la seconde : plus encore que la laccase, la tyrosinase paraît adaptée à la formation de corps complexes aux dépens de corps simples, et moins encore à des combustions complètes telles que nous les cherchons, qui sont au contraire des formations de composés simples (CO^2, H^2O) aux dépens de composés complexes. A vrai dire, on ignore encore, dans la plupart des cas, la manière exacte dont elle agit ; mais son aptitude à créer des corps colorés (la coloration étant très souvent, pour les matières organiques, un indice de complexité) fait douter que son action oxydante puisse jamais être complète. Elle semble, plutôt, spécialisée dans la production des pigments colorés ; on lui attribue les teintes variées que prennent beaucoup de champignons et de fruits sur leurs coupures fraîches, exposées à l'air ; on lui attribue encore la production de la sépia chez la seiche, le brunissement du pain bis, les colorations si foncées des insectes ; la formation de taches noires sur le corps de beaucoup d'animaux supérieurs ; enfin, on suppose encore que c'est à elle que les nègres doivent la couleur noire de leur peau. Tout ceci montre bien l'ubiquité de la tyrosinase, mais nous éloigne de plus en plus de lui attribuer un rôle actif dans la respiration ; il semble que ses fonctions soient beaucoup plus modestes.

Avec la laccase et la tyrosinase, nous avons vu les deux principales diastases oxydantes, et notre hypothèse d'après laquelle celles-ci seraient des diastases respiratoires ne s'est guère confirmée. Il ne faudrait pas conclure trop hâtivement contre elles, car nous ne les connaissons pas toutes. Ce qui a mis, jusqu'ici, sur la trace des oxydases et en a facilité l'étude, c'est leur propriété de donner des composés colorés dans des mélanges incolores. Le changement de teinte d'un mélange est, en effet, un moyen d'observation extrêmement commode. Or il n'y a pas du tout de raison pour que les oxydases donnent toujours des corps colorés ; le contraire est infiniment plus probable, mais il est beaucoup plus difficile d'en découvrir et d'en isoler une si elle n'en donne pas, car il faut pour cela de véritables *expériences* au lieu de simples *observations*. La diastase que nous cherchons sans l'avoir encore trouvée, celle qui oxyde la matière des cellules à l'état d'acide carbonique (celle ou plutôt celles, car il peut y en avoir plusieurs agissant successivement) ne donnant pas de colorations, peut avoir passé inaperçue. Si elle existe, d'ailleurs, il semble probable que son fonctionnement doit offrir quelque chose de spécial, ou nécessiter des conditions qui ne sont remplies que pendant la vie, et surtout pendant la vie active. En effet, la respiration est en rapport étroit, chez les animaux, avec la contraction musculaire, et elle devient beaucoup plus intense quand on se livre à un travail physique ; la quantité d'acide carbonique dégagé peut devenir trois ou quatre fois plus forte pour un

homme qui court que que pour un homme immobile. Elle diminue au contraire beaucoup après la mort ; c'est ainsi qu'un petit oiseau devrait, s'il continuait à s'oxyder, après sa mort, comme durant sa vie, *s'évaporer* complètement en moins de trente-six heures.

Ceci donne à penser que, même si l'oxydation respiratoire est due à une oxydase, on ne pourrait retirer cette oxydase sans lui faire perdre une partie de son activité, qui paraît reposer sur un ensemble de circonstances assez fragiles. Par suite, il n'y a pas contradiction absolue entre notre hypothèse et les résultats expérimentaux. Il serait téméraire de dire qu'il y a accord, et il vaut mieux conclure que la question reste ouverte. Nous verrons plus tard que l'étude de la fermentation alcoolique permet de la poser peut-être d'une autre manière.

Je signalerai ici en passant, et sans m'y arrêter, que les oxydases ne sont pas les seules diastases auxquelles on attribue un rôle actif dans les phénomènes de respiration. D'après Bach et Chodat, elles pourraient être suppléées dans ce rôle par les peroxydases ou peroxydiastases, qui ont la propriété de décomposer l'eau oxygénée (peroxyde d'hydrogène) et généralement tous les peroxydes en portant leur oxygène sur des corps oxydables. Dans cette hypothèse, certaines substances contenues dans les organismes pourraient, au contact de l'oxygène, donner des peroxydes ; la peroxydase porterait l'oxygène de ce peroxyde sur un autre corps organique,

qui serait brûlé. Bach et Chodat se fondent sur ce fait que les peroxydases sont encore beaucoup plus répandues que les oxydases, et sur ce que beaucoup de matières organiques (l'éther par exemple) donnent des peroxydes au contact de l'air.

L'explication des combustions organiques par l'intervention des diastases, oxydases ou peroxydases, est séduisante en ceci qu'elle ne fait intervenir aucune hypothèse proprement dite; on peut plutôt la considérer comme la généralisation de faits connus. Avant de l'accepter, il faudra cependant se demander si elle est nécessaire et si on n'arriverait pas au même résultat par un chemin très différent.

Tout le monde a vu, à la dernière page des journaux, des hercules au corps sillonné de foudres, avec cette légende : l'Électricité, c'est la Vie. Quoique cette maxime soit présentée, pour les besoins de la cause, sous une forme absolue que rien ne justifie, il y a trop de faits établissant une relation (très vague d'ailleurs) entre l'électricité et les phénomènes de la vie pour que nous n'ayons pas toujours un œil tourné de ce côté. Nous avons fait intervenir les diastases oxydantes, parce que nous ne pouvions pas, sans leur secours, expliquer par les seules affinités chimiques la combustion, à la température ordinaire, de composés inattaquables par l'oxygène à cette température. Mais l'électricité, elle aussi, est souvent bien plus puissante que les affinités chimiques. Un courant électrique, passant dans

une solution d'acétate de potasse, donne du carbonate de potasse, de l'acide carbonique, de l'éthane et de l'hydrogène :

$$2CH^3.CO^2K + H^2O = CO^3K^2 + CO^2 + C^2H^6 + H^2$$

Dans cette expérience, la moitié du carbone de l'acétate est complètement brûlée à l'état d'acide carbonique, résultat auquel il serait bien difficile d'arriver, à la même température, par une voie purement chimique. D'après Perkins, le courant électrique oxyderait aussi le pyrogallol, en donnant le même produit (purpurogalline) que nous avons vu se former par l'action de la laccase. Il existe, dans la littérature chimique, beaucoup de faits du même ordre, relatifs à des substances organiques plus ou moins voisines de celles qui existent dans la nature : l'oxydation par l'électrolyse est donc un fait général[1]. On ne peut naturellement pas affirmer que la même cause agit dans l'organisme, faute de connaître le mécanisme des actions électro-vitales : aussi je ne signale ces faits que parce qu'ils marquent une possibilité, et aussi parce qu'ils donnent matière à une remarque assez curieuse. Il n'est pas bien commode d'expliquer, par l'action des diastases, l'accélération des combustions produite par le travail musculaire ; il semble qu'on y arriverait beaucoup plus aisément en invoquant des oxydations d'origine électrique. C'est surtout,

1. Les oxydations se produisent au pôle positif. Les phénomènes de réduction, au pôle négatif, sont peut-être encore plus nombreux.

en effet, dans ce qui se rapporte à la contraction musculaire que l'intervention de l'électricité est le plus marquée.

Nous pouvons nous en tenir là de l'étude particulière des diastases. Quoiqu'il en existe bien d'autres, dont les rapports avec les phénomènes vitaux sont assez exactement connus, leur description nous entraînerait trop loin dans le détail et ne nous apprendrait pas grand chose de nouveau. Une seule diastase est assez importante et se présente avec des caractères assez particuliers pour mériter une étude spéciale : la zymase ou diastase alcoolique, qui fait l'objet du chapitre suivant.

CHAPITRE VI

LA FERMENTATION ALCOOLIQUE

Le phénomène de la fermentation alcoolique consiste en ce qu'un sucre, notamment le sucre de cannes ou le glucose, sous l'influence d'un organisme microscopique appelé la levure, se dédouble en donnant de l'alcool et de l'acide carbonique. Avec le glucose, la réaction s'écrit

$$C^6H^{12}O^6 = 2\,C^2H^6O + 2\,CO^2$$

c'est-à-dire que 180 grammes de glucose donnent 92 grammes d'alcool et 88 grammes d'acide carbonique [1]. Avec le saccharose (sucre ordinaire, sucre de cannes ou de betteraves), on a

$$C^{12}H^{22}O^{11} + H^2O = 4\,C^2H^6O + 4\,CO^2$$

342 grammes de saccharose donnent ici 184 d'alcool et 176 d'acide carbonique. En y regardant de près, on voit que ce second cas se ramène au

1. C'est l'équation de Gay-Lussac. Elle n'est pas rigoureusement exacte : à côté de l'alcool et de l'acide carbonique il se forme toujours de la glycérine (nombres variables, voisins de 3 p. 100) et de l'acide succinique (moins de 1 p. 100). Ces deux produits, peu abondants à l'égard des autres, peuvent être négligés dans une étude chimique du phénomène.

premier, car l'opération se fait en deux phases. Le saccharose ne fermente pas tel quel, mais il s'hydrate d'abord sous l'influence d'une diastase contenue dans la levure, la *sucrase*, et se transforme en un mélange d'une molécule de glucose et une molécule de lévulose, ces deux substances ayant la même composition chimique $C^6H^{12}O^6$ et ne différant que par l'arrangement des atomes. Dans une deuxième phase, le glucose et le lévulose fermentent séparément[1]. Ainsi, tous les cas de fermentation alcoolique due à la levure se ramènent somme toute à un seul, et tout ce qui est dit de l'un des sucres fermentescibles pourrait être répété de tous les autres.

Quelle est la cause de cette transformation ? On pense aujourd'hui qu'elle se produit sous l'influence d'une diastase, la *zymase* de Buchner, découverte il y a douze ans. Mais son ancienneté et son importance ont attiré depuis longtemps sur elle l'attention des chimistes, et il n'y a guère de sujet sur lequel leur imagination se soit autant exercée, et ait abouti à autant de théories contradictoires. Les raisons invoquées de part et d'autre n'ont pas été toujours exclusivement scientifiques, et en particulier, la fermentation alcoolique est l'un des sujets de querelles qui ont mis le plus tard aux prises les partisans de la force vitale et ses adversaires.

Le fait que la formation de l'alcool et de l'acide carbonique est corrélative de la présence et de la

1. Quelques chimistes pensent que le lévulose lui-même se transforme en glucose avant de fermenter, et que ce dernier est en réalité le seul sucre fermentescible. Le fait n'est pas démontré.

vie de la levure, organisme ou plante microscopique, n'a été, comme on le sait, clairement reconnu et démontré que par Pasteur. Pour expliquer cette transformation, il ne semblait pas au premier abord que l'on pût invoquer autre chose que la force vitale. En effet, le glucose comme le sucre sont des matières parfaitement stables. On ne connaît aucun réactif chimique qui leur fasse subir une transformation identique à celle que réalise si facilement la levure. On n'en connaît même pas qui ait une action comparable, et, dans toute la chimie, il n'y a que de très rares exemples de dédoublements de ce genre, effectués à la température ordinaire, avec une aussi grande régularité. Il ne semblait donc pas qu'on pût s'en tirer avec les seules ressources de la chimie : il fallait avoir recours au principe mystérieux de la vie.

Cependant, on connaissait déjà des diastases : l'amylase, par exemple, qui change l'amidon en maltose. Quoiqu'on ne sache pas encore très bien de quoi se compose la molécule de l'amidon, il n'est guère contestable que, pour former du maltose, elle se brise en plusieurs morceaux : il y a donc une certaine analogie avec le sucre qui, lui aussi, est brisé par la fermentation en acide carbonique et en alcool. Il était extrêmement tentant d'expliquer la fermentation, elle aussi, par l'intervention d'une diastase. Il semble que le premier qui ait présenté cette théorie soit Moritz Traube, en 1858, mais elle était, pour ainsi dire, dans l'air, car Berthelot l'a présentée de son côté en 1860.

Cette conception de la nature diastasique du phénomène s'étendait tout naturellement à d'autres cas, car la fermentation alcoolique n'est pas la seule que l'on connaisse; il en existe d'autres : fermentation lactique, fermentation butyrique, qui se présentent sous des apparences exactement semblables, et si l'on admet que la première est causée par une diastase, il n'y a pas de raison pour ne pas l'admettre aussi pour les autres. Cette grande extension était, pour la démonstration, une difficulté considérable; on ne pouvait, en effet, faire triompher le concept de la diastase et réfuter les partisans de la force vitale que si on montrait cette diastase. Or, on n'y pouvait réussir pour aucune, tandis que l'extraction de diastases d'une autre nature, telles que l'amylase, était des plus faciles. Pour expliquer ces insuccès, il avait fallu compliquer les hypothèses au point qu'elles perdaient toute netteté. C'est ainsi que Berthelot admettait que la diastase était à chaque instant détruite par le fait même qu'elle agissait :

« Depuis que les découvertes capitales de M. Pasteur ont fixé nos idées sur l'origine et la multiplication des êtres organisés qui propagent les fermentations, un problème nouveau a été posé : il s'agit de savoir si le changement chimique, produit dans toute fermentation, ne se résout point en une réaction fondamentale, provoquée par un principe défini, spécial, de l'ordre des ferments solubles, lequel se consomme, en général, au fur et à mesure de sa production, c'est-à-dire se transforme chimiquement pendant

l'accomplissement même du travail qu'il détermine. Pour connaître un tel ferment, il faut savoir l'isoler, c'est-à-dire constater les conditions spéciales où le ferment soluble est sécrété suivant une proportion plus grande qu'il n'est consommé[1]. »

Or, cette explication était inadmissible et montrait un parti pris évident : d'abord parce qu'une diastase est justement définie comme une substance qui *ne se détruit pas* en agissant, et ensuite parce qu'elle ne faisait que reculer la difficulté, en ramenant la production d'acide carbonique et d'alcool à la production continue d'une diastase de constitution certainement beaucoup plus compliquée, c'est-à-dire en ramenant un phénomène relativement simple à un autre moins simple et tout aussi inintelligible. Il aurait mieux valu convenir franchement que la supposition de l'existence d'une diastase alcoolique était provisoirement contredite par l'expérience[2].

1. *Comptes rendus*, 29 juillet 1878. L'exemplaire des *Comptes rendus* conservé à la bibliothèque de l'Institut Pasteur porte, en face de cet alinéa, la note suivante de la main de Pasteur : « On ne saurait être plus habile. Quand j'aurai montré que Bernard s'est trompé, M. Berthelot dira : le ferment soluble se forme, mais il se détruit au fur et à mesure qu'il est présent. »

La discussion entre Pasteur et Berthelot avait pour origine la publication de notes posthumes de Claude Bernard.

2. Les théories de ce genre, d'après lesquelles une substance se forme et disparaît aussitôt, ont toujours été à la mode quand il s'agit de diastases. Ostwald a insisté sur ce fait qu'elles n'ont aucune valeur scientifique tant qu'on n'a pas :

1° Isolé cette substance;

2° Déterminé la vitesse avec laquelle elle se produit;

3° Déterminé la vitesse avec laquelle elle se détruit.

Suivant un mot profond et original de M. Schuster, « une théorie ne vaut rien quand on ne peut pas démontrer qu'elle est fausse ».

La possibilité de cette existence n'était du reste niée par personne, et l'on se tromperait étrangement si l'on croyait que les partisans de l'action vitale ne pouvaient s'en accommoder[1]. Les preuves du contraire abondent : c'est ainsi que Pasteur écrivait :

« Lorsque, à l'exemple de Claude Bernard, M. Berthelot aura tenté d'appuyer par l'expérience ses hypothèses, aujourd'hui sans valeur parce qu'elles sont toutes gratuites, s'il découvre un ferment alcoolique soluble, j'applaudirai à sa découverte, qui sera des plus intéressantes et ne me gênera aucunement. » (Comptes rendus, 30 décembre 1878.)

« J'ajoute, en terminant, que c'est toujours une énigme pour moi que l'on puisse croire que je serais gêné par la découverte de ferments solubles dans les fermentations proprement dites ou par la formation de l'alcool à l'aide du sucre, indépendamment des cellules » (*Ibid.*).

Bien plus, Pasteur et ses collaborateurs se mirent à la recherche de la diastase supposée (alcoolase), faisant ainsi le travail qui incombait logiquement à leurs adversaires :

1. C'est ainsi que M. Matignon écrit : « Pasteur soutenait, avec expériences à l'appui, que la fermentation du glucose exige absolument la présence de la levure de bière, tandis que, d'après Berthelot, la transformation du glucose en alcool pouvait avoir lieu par l'intermédiaire d'un ferment non vivant, d'une diastase émise par la levure elle-même... Vingt ans après, un savant allemand, Buchner, démontrait que la levure suffisamment pressée fournit un liquide sans trace de cellule vivante et susceptible de continuer pendant quelque temps la fermentation de jus sucrés. Le flair génial de Berthelot avait eu raison de l'habileté expérimentale de Pasteur. »

« D'autres encore se mirent à la recherche de l'alcoolase. M. Denys Cochin fit au laboratoire de Pasteur des tentatives qui n'aboutirent pas. Pasteur lui-même entreprit des expériences sur le sujet, et je me souviens qu'à l'époque où j'entrai à son laboratoire, il essayait d'extraire le ferment alcoolique soluble des cellules de levure en les broyant dans un mortier, en les congelant pour les faire éclater, ou encore en les mettant dans des solutions salines concentrées pour forcer le suc à sortir par osmose à travers l'enveloppe. Vains efforts. Pasteur ne trouva pas l'alcoolase, si bien que, s'il croyait son existence possible, il ne pensait pas qu'elle fût une réalité [1]. »

Le fait de l'existense d'une alcoolase (maintenant *zymase*), n'avait rien qui pût gêner Pasteur. Sa grande découverte consistait en ceci que les fermentations, au lieu d'être causées, comme le voulait Liebig, par des réactifs chimiques, étaient dues à des organismes vivants. Quel que fût le mode d'action de ces êtres vivants, la découverte n'en subsistait pas moins. Il avait, comme ses contradicteurs, le droit de préférer telle ou telle explication, puisqu'aucune n'était ni démontrée, ni même appuyée par un fait quelconque ; il eût certainement préféré que la zymase n'existât pas, ou plutôt, il était plus conforme à l'ensemble de ses doctrines que la zymase n'existât pas : mais si elle existait, *pourvu qu'elle n'apparût pas dans les phénomènes de fermenta-*

1. Em. Roux. Discours prononcé à Lille. (*Annales de la brasserie et de la distillerie*, p. 512, 1898.)

tion en l'absence d'organismes vivants, elle ne pouvait le gêner en rien. Or, nous savons maintenant qu'une zymase existe et je la décrirai plus loin : mais elle n'existe que dans les cellules végétales, elle n'apparaît jamais, dans les phénomènes de fermentation, en l'absence de levure : il n'y a donc aucune erreur, aucun mauvais joint dans les idées de Pasteur.

Plus heureux que lui, ses successeurs ont dû à de simples perfectionnements de technique d'isoler la diastase qu'il avait vainement cherchée. Mais, malgré de nombreuses tentatives, ils n'y ont réussi que plus de dix ans après, en 1897. La méthode est très simple, puisqu'elle consiste à pulvériser la levure et à la presser : mais cette pulvérisation est fort difficile à cause de la petitesse des cellules de levure, qui ont moins de $\frac{1}{100}$ de millimètre de diamètre et sont, en plus, aussi élastiques que de petites balles de caoutchouc. Pour la réaliser, il faut — et c'est en ceci simplement que consiste le perfectionnement apporté par Buchner, l'inventeur de la zymase — mêler la levure avec du sable et du tripoli, formé de carapaces siliceuses d'infusoires, très dures et très fines. Le mélange est trituré à l'aide d'un lourd pilon de fer, puis soumis à l'action d'une presse hydraulique dont on fait peu à peu monter la pression jusqu'à 500 kilos par centimètre carré, à mesure que le jus s'écoule. On arrive par ce procédé à extraire, d'un kilogramme de levure, environ un demi-litre de suc cellulaire.

Ce suc contient bien la zymase cherchée, car

il fait fermenter le sucre qu'on y dissout : il se dégage de l'acide carbonique, et la distillation du liquide restant permet d'en retirer de l'alcool. 40 centimètres cubes de suc cellulaire, représentant 80 grammes de levure, peuvent transformer complètement dix grammes de sucre en donnant, comme dans le cas de la fermentation ordinaire, cinq grammes d'alcool à peu près, et sensiblement le même poids d'acide carbonique (soit environ 3 litres, ce qui suffit pour faire mousser abondamment le liquide). On vérifie d'autre part que le suc de levure ne contient aucune cellule ayant survécu au broyage[1] et à laquelle on pourrait rapporter l'effet constaté ; celui-ci est donc dû à des matières dissoutes, et il faut bien admettre que la fermentation alcoolique est possible en l'absence de tout organisme vivant, *au sens où l'on prend ce mot d'ordinaire* ; nous verrons tout à l'heure l'importance de cette restriction.

Voyons maintenant à quelle autre cause peut être due cette fermentation par le suc de levure pressée. On peut l'attribuer à une diastase ou bien à une réaction chimique ordinaire, puisque nous ne connaissons pas d'autres modes d'action. Les diastases ont un certain nombre de propriétés nécessaires ; en particulier, comme nous l'avons vu, il doit y avoir disproportion entre le poids de la diastase et le poids de matière qu'elle transforme. Or, justement, dans le cas de la diastase

1. Ou du moins un nombre de cellules insuffisant à expliquer les effets constatés.

supposée (zymase), cette disproportion n'existe pas : 100 centimètres cubes de suc cellulaire, qui peuvent faire fermenter au plus 23 grammes de sucre, contiennent 14 grammes de substance sèche. Il est vrai qu'on a de bonnes raisons pour penser que la zymase ne forme qu'une assez faible partie de la masse[1] ; mais on n'en a pas la preuve, les essais faits pour retirer du suc brut une zymase plus pure et plus active ayant jusqu'ici échoué.

Un autre caractère que doivent présenter les diastases est de ne pas s'user en agissant : c'est ce qui les distingue des réactifs ordinaires. Or, la zymase s'use même sans agir : elle se conserve très difficilement, même à la glacière, et perd son activité en quelques jours, c'est-à-dire juste pendant le temps qu'elle mettrait à faire fermenter une quantité un peu considérable de sucre. Une expérience décisive, une épreuve de durée n'est donc pas réalisable : il faudrait montrer que, après avoir fait fermenter complètement une dose de sucre, la zymase est encore en mesure d'en faire fermenter avec la même activité une deuxième dose égale à la première ; on constate bien qu'il n'en est rien, mais on n'en peut rien déduire, car, la fermentation prenant plusieurs jours, on ne sait si l'affaiblissement constaté est dû à une fatigue de la diastase ou simplement à son altération sous l'influence du temps.

1. En effet, le pouvoir ferment d'un suc de levure n'est pas proportionnel à la quantité de substance sèche contenue dans ce suc. Mais ceci ne prouve rien, car l'activité d'une diastase dépend de tout autre chose que de sa seule quantité.

Les deux caractères principaux font donc défaut. Puis, si l'on veut que la zymase soit une diastase, on rencontre encore d'autres difficultés : ainsi il n'y a aucun rapport entre la force fermentative du suc de levure, de la zymase, et celle de la levure employée. Le suc de 1 kilo de levure fait fermenter, en quarante heures et à 12°, 130 grammes de sucre au maximum, alors que ce même kilogramme de levure, ensemencé dans une solution de sucre, en ferait facilement fermenter 40 kilogs dans le même temps, ou trois cents fois plus. Si cependant le pouvoir ferment de la levure était dû uniquement à la zymase dissoute dans le suc cellulaire, comme nous retirons par la pression plus de la moitié de ce suc cellulaire, nous devrions en même temps retirer plus de la moitié, et non le $\frac{1}{300}$ du pouvoir ferment. Il y a là une contradiction évidente.

On pourrait croire que cette très grande différence est due aux variations de la quantité de zymase contenue dans les cellules, car il semble naturel de supposer que la levure en contient beaucoup plus lorsqu'elle est placée dans une solution sucrée, et par suite en état d'activité, que lorsqu'elle est au repos, de même que la muqueuse de l'estomac sécrète plus de pepsine lorsque l'estomac reçoit des aliments que lorsqu'il est vide. Il n'en est rien, car si on traite une levure prise en pleine fermentation, le suc qu'on en extrait est beaucoup plus pauvre que si, après l'avoir retirée du moût sucré, on abandonne cette

levure à elle-même dans l'eau froide. La difficulté subsiste donc et même s'aggrave[1].

Une quatrième difficulté résulte de ce que la levure et le suc de levure ne font pas fermenter le sucre à la même concentration ; la zymase est encore active dans une solution contenant 40 p. 100 de sucre, sur laquelle la levure dont elle a été extraite est absolument sans action. Enfin, l'étude de l'influence des antiseptiques en fait surgir une autre encore : l'addition de 1 p. 100 de toluène à un moût sucré paralyse la levure et reste sans action sur la zymase. Il semble qu'il ne devrait pas en être ainsi si vraiment la zymase était le principe actif de la levure.

Que conclure de cet ensemble de faits contradictoires ? Evidemment, la preuve de la nature diastasique de la zymase n'est pas faite, et il faut examiner si l'intervention d'un réactif chimique ordinaire ne permettrait pas d'expliquer les faits observés. Cela n'est pas bien facile : si, en effet, il est possible qu'un tel réactif puisse former, aux dépens du glucose, de l'alcool et de l'acide carbonique, il serait assez extraordinaire qu'il les laisse *libres tous deux*. Il est, en effet, contraire aux habitudes de la plupart des composés chimiques de faire ainsi des dégâts chez le voisin sans rien emporter. L'acide sulfurique coupe l'alcool en éthylène et en eau, mais il garde l'eau pour lui. La potasse décompose de même l'acide oxalique en acide formique et acide carbonique,

1. La zymase n'est pas non plus retenue par le sable ni par le tripoli. Bien au contraire, d'après Buchner, le gâteau pressé n'a qu'un faible pouvoir ferment. Ce point cependant serait à revoir.

mais elle garde le premier. Ici, la substance qui devrait réaliser ce dédoublement devrait être entièrement désintéressée, et le désintéressement est chose rare.

L'objection, cependant, n'est pas irréfutable. Le permanganate de potasse décompose l'eau oxygénée en eau et en oxygène, en se décomposant lui-même sans retenir ni eau ni oxygène, par une réaction chimique parfaitement régulière. L'oxyde d'argent, le bioxyde de plomb, agissent de même. Il n'est donc pas impossible de concevoir une substance qui détruise le sucre en même temps qu'elle se détruit elle-même, quoique le sucre soit une substance autrement stable que l'eau oxygénée. Mais, quel devrait être le poids moléculaire de cette substance ? Si elle agit comme le permanganate sur l'eau oxygénée, il en faut une molécule, ou du moins une fraction notable de molécule, pour décomposer une molécule de glucose. Or, celle-ci pèse 180 grammes ; il faut, pour la détruire, environ 100 grammes de zymase brute. Le poids moléculaire de la zymase pure sera donc voisin de 100, si elle constitue la totalité de la zymase brute ; de 10, si — supposition beaucoup plus vraisemblable — elle n'en constitue que 10 p. 100. Or, nous connaissons tous les composés qui ont un poids moléculaire de cet ordre, et aucun d'eux ne fait fermenter le sucre ; donc, ou bien une molécule de zymase, en se détruisant, détruit en même temps plusieurs molécules de sucre, ou bien la zymase est bien décidément une diastase. La première supposition nous paraît peu

vraisemblable, d'autant plus que le mécanisme de la formation continue de cette zymase-réactif est, comme je l'ai dit, une difficulté encore beaucoup plus sérieuse. Nous admettons donc la seconde. Il nous reste alors à expliquer pourquoi la zymase est aussi différente des autres diastases, et quelles sont les raisons des anomalies que nous avons constatées. A cette double question, Buchner répond : la zymase est une diastase, il est vrai, mais c'est *presque une matière vivante*. On voit tout de suite que cette réponse ne constitue pas une explication au sens scientifique du mot ; elle indique seulement des analogies qui pourront mettre plus tard sur la voie d'une explication.

La membrane extérieure d'une cellule est, pour cette cellule, une garantie de durée, car, si elle n'existait pas, la moindre agitation mélangerait le contenu de cette cellule au liquide extérieur. Elle n'est pas, au moins pour un court espace de temps, une condition nécessaire de la vie ; elle la renferme et la protège, elle ne la constitue pas. Le procédé d'extraction de Buchner revient, somme toute, à *peler* la cellule : il lui enlève son individualité et sa défense contre l'extérieur, *mais non sa vie*, et c'est pourquoi nous retrouvons dans le suc extrait par pression les propriétés de la levure. Un flacon plein de ce suc est une cellule rudimentaire : c'est une cellule qui, abandonnée à elle-même, meurt comme une cellule ordinaire, c'est-à-dire perd ses propriétés diastasiques. Elle les perd moins vite si

on ajoute du sucre, parce que, si déformée qu'elle soit, le sucre est encore un aliment pour elle. Elle respire encore, car elle dégage spontanément de l'acide carbonique. Elle assimile peut-être, car, sur 100 grammes de sucre qu'on lui fournit, on n'en retrouve que 85 à l'état d'alcool et d'acide carbonique, tandis que les 15 derniers disparaissent sans laisser de traces, comme s'ils étaient entrés dans une combinaison. Assurément, les propriétés qui peuvent dépendre de la forme et de la structure de la cellule, ou de la présence du noyau, sont complètement anéanties ; on ne peut s'attendre, par exemple, à voir une pareille cellule géante se reproduire. Mais, si cruel que soit le traitement qu'on a fait subir à la levure, pour lui enlever tout son suc, il faut bien remarquer que rien dans ce traitement (qui est effectué assez rapidement) n'est de nature à altérer chimiquement le protoplasme de la cellule, puisque les seules matières que l'on mette en contact avec elle sont du sable et du tripoli qui sont parfaitement inertes. Le suc que nous obtenons est du protoplasme à peine modifié, ce n'est nullement une solution de diastase. Nous avons cru réaliser la vie sans cellule, et nous n'avons réussi qu'à transformer quelques milliards de cellules résistantes en une seule beaucoup plus grande et beaucoup plus fragile. La zymase n'a pas été séparée de la matière vivante : *elle reste à découvrir*.

La levure n'est pas la seule plante dont les cellules renferment de la zymase. On a pu en

extraire d'autres plantes inférieures, notamment de moisissures ; on peut la considérer comme particulièrement abondante chez celles qui ont le pouvoir de provoquer une fermentation alcoolique active, comme la levure ou les moisissures qui, dans les pays d'Extrême-Orient, la remplacent : aspergillus orizae, amylomyces, mucor, récemment introduits en Europe dans l'industrie de la distillerie. Mais certaines plantes supérieures peuvent aussi en renfermer des quantités très notables et provoquer, par suite, des fermentations alcooliques. Lechartier et Bellamy ont montré, il y a bien longtemps, la formation d'alcool dans des fruits suspendus dans une atmosphère privée d'oxygène, et le dégagement d'une quantité à peu près équivalente d'acide carbonique. Depuis, M. Mazé, puis Godlewski et Polszenius, ont repris les mêmes études, et toujours avec le même résultat. Dans les pois verts, conservés sous l'eau, cette fermentation est extrêmement active ; ils peuvent perdre, par respiration *intramoléculaire* (c'est-à-dire à l'abri de l'oxygène), en quarante-deux jours, jusqu'à 45 p. 100 de leur poids, en donnant des quantités à peu près égales d'alcool et d'acide carbonique [1]. Le phénomène n'est pas toujours aussi net ni aussi facile à étudier : quand la fermentation est moins active, il est assez difficile de déceler l'acide carbonique, et on se contente

1. Les pois ont même la propriété de faire fermenter une solution sucrée, par simple contact : ils se comportent donc exactement comme des cellules de levure, quoique leur activité soit moindre.

de rechercher l'alcool : c'est ce qu'on fait Berthelot, Devaux et Mazé qui en ont trouvé dans un très grand nombre d'organes végétaux. Ainsi, il semble que la zymase soit une diastase fort répandue, et ceci amène à se demander si elle ne joue pas un rôle dans la physiologie de la plante.

Nous avons déjà vu que les plantes respirent, c'est-à-dire qu'elles absorbent de l'oxygène et exhalent de l'acide carbonique. De cette respiration, on peut faire deux parts, l'une qui est la respiration intramoléculaire, se produisant à l'intérieur de la cellule, même en absence d'oxygène (c'est à celle-ci que se rapportent les expériences de Lechartier et Bellamy, Mazé, Godlewski et Polszenius) ; l'autre, la respiration extérieure, consistant en une véritable combustion à laquelle l'oxygène du dehors est nécessaire. Les résultats que je viens de résumer tendent à faire penser que la respiration intramoléculaire n'est autre chose qu'une fermentation alcoolique. L'amidon, ou les sucres que la cellule contient toujours, s'hydrolysent, et, sous l'influence d'une zymase, se dédoublent en alcool et acide carbonique.

$$C^6H^{12}O^6 = 2\,CO^2 + 2\,C^2H^6O$$

C'est en effet suivant ce modèle que se fait la respiration intramoléculaire dans tous les cas où on a pu la mesurer, et l'hypothèse consiste simplement à admettre qu'il en est encore ainsi dans tous les autres, ce qui est assez vraisemblable. Mais Pfeffer et Wortmann sont allés

beaucoup plus loin. Pour eux, la respiration ordinaire, en présence d'oxygène, n'est aussi qu'une fermentation alcoolique, ou plutôt une des phases est une fermentation alcoolique. L'alcool, produit de cette fermentation, est lui-même oxydé, soit incomplètement, d'après le schéma suivant,

$$3C^2H^6O + 3O^2 = C^6H^{12}O^6 + 3H^2O$$

le produit le l'oxydation étant le glucose ou un isomère ; soit complètement,

$$C^2H^6O + 3O^2 = 2CO^2 + 3H^2O$$

Cette théorie a l'avantage évident de faire dépendre les deux respirations d'un même mécanisme, au moins au début. Elle explique le dégagement d'acide carbonique, l'accumulation de l'alcool par l'asphyxie de la plante privée d'oxygène ; la variabilité enfin du rapport $\frac{CO^2}{O^2}$ des physiologistes, c'est-à-dire du rapport de l'acide carbonique exhalé à l'oxygène absorbé. Au point de vue chimique, elle soulève des difficultés, non pas pour la première phase, mais pour la seconde. En effet, quoiqu'il ne soit nullement invraisemblable que l'oxydation de l'alcool puisse donner du sucre, nous ne voyons pas comment cette transformation pourrait se faire, l'oxydation de l'alcool au laboratoire ne donnant que de l'aldéhyde [1] ou de l'acide acétique, qui sont des corps

1. L'aldéhyde est aussi un produit d'oxydation organique de l'alcool. MM. Trillat et Sauton ont montré que la levure, agitée au contact de l'air avec de l'alcool dilué, l'oxyde très rapidement en aldéhyde.

tout à fait différents. Il faudrait, pour l'expliquer, invoquer l'action d'un ferment spécial, et retrouver par suite en complication, de ce côté, ce qu'on aurait gagné d'un autre en simplicité. Cependant, en supposant que l'alcool soit oxydé à l'état d'aldéhyde formique, on diminue beaucoup la difficulté, puisque nous savons, d'autre part, que les tissus végétaux savent transformer cette aldéhyde en sucres. En tout cas, cette tentative d'explication des phénomènes de respiration méritait d'être signalée ; elle est assez différente de celle que nous avons précédemment examinée et qui s'appuie sur l'existence de diastases oxydantes, oxydases ou peroxydases.

CHAPITRE VII

LA MATIÈRE ORGANISÉE

La distinction entre matière organique et matière organisée, telle que nous l'avons vue établie par Dumas en 1835, correspondait dans l'esprit de ce chimiste à une séparation très nette. La première seule, la matière organique, disait-il, est du domaine de la chimie ; la matière organisée est du domaine de la biologie. Des définitions aussi absolues ne sont plus possibles aujourd'hui, car la biologie a dû abandonner à la chimie une bonne partie de ce qui était autrefois son domaine. On ne peut cependant pas les oublier complètement, et le moment est venu d'examiner pourquoi.

Une substance *organique* est un composé bien défini, que nous trouvons tout fait dans le corps d'un être vivant, plante ou animal ; par extension, c'est un dérivé quelconque de ce composé, pourvu que ce dérivé contienne encore du carbone. Le sucre, que nous extrayons d'une betterave ou d'autres végétaux, est une matière bien cristallisée, de composition et de propriétés toujours identiques, quelle qu'en soit l'origine ; c'est donc une substance organique. La glycé-

rine, que nous savons retirer d'une graisse animale ou d'une huile végétale, est encore une substance parfaitement déterminée. Deux échantillons de glycérine pure, quand bien même ils auraient été préparés, à une date différente, à partir de deux matières premières différentes, seraient nécessairement identiques ; on ne peut pas concevoir que rien puisse les distinguer l'un de l'autre. Un grand nombre de composés chimiques définis, comme le sucre et la glycérine, ont pu être extraits, à l'état de pureté, des animaux ou des végétaux ; ils forment la classe des composés organiques, et leur nombre, en ajoutant celui de leurs dérivés, dépasse aujourd'hui probablement 50.000.

Il s'en faut de beaucoup que tous les éléments des cellules vivantes se présentent dans des conditions aussi grandes de simplicité. Prenons par exemple l'un des plus connus : l'amidon. Il se trouve, sous forme de petits grains, dans beaucoup de végétaux, notamment, comme nous l'avons vu, dans les feuilles insolées. Il s'accumule souvent dans les graines : c'est ainsi qu'il forme la plus grande partie du grain de blé ou du grain de riz. Il s'accumule souvent aussi dans les racines ou dans les tubercules : ce qu'on appelle la fécule de pomme de terre n'est pas autre chose que de l'amidon.

Il y a ainsi un assez grand nombre de matières premières, de *minerais* d'amidon, pour ainsi dire. Supposons qu'à chacun de ces minerais nous appliquions un procédé d'extraction convenable : nous devrions, s'il s'agissait d'un composé

organique comme le sucre, aboutir dans tous les cas au même produit, de même qu'on arrive au même produit en traitant, soit la canne à sucre, soit la betterave. Il n'en est rien. L'amidon de riz n'est pas identique à celui de la pomme de terre, ni celui-ci à celui du blé. Ils n'ont ni la même composition, ni les mêmes propriétés, et, si par exemple nous les délayons dans l'eau et faisons chauffer l'émulsion ainsi produite, nous verrons qu'ils se gonflent, se dissolvent et forment un *empois* transparent et visqueux à des températures très différentes :

L'amidon de pommes de terre	se gonfle vers		65°
—	froment	—	70°
—	maïs	—	75°
—	riz	—	80°

On pourrait essayer d'expliquer cette discordance en disant qu'il s'agit en réalité de différents amidons, présentant, à côté de propriétés communes qui permettent de les appeler tous du même nom, quelques divergences, de même que le glucose et le lévulose, par exemple, ont assez de propriétés communes pour pouvoir être désignés tous deux sous le nom de sucres, quoique l'un fasse tourner à droite et l'autre à gauche le plan de polarisation de la lumière. Certains fruits contiennent du lévulose, d'autres du glucose ; de même il pourrait se faire que le blé contienne un amidon et le riz un autre.

Mais, en réalité, les choses ne sont pas aussi simples. Par exemple, il est facile de voir que dans un grain d'amidon (qui n'a pourtant que

quelques centièmes de millimètres de diamètre) les parties centrales ne sont pas du tout identiques aux parties voisines de la surface. Quand on met un grain d'amidon dans l'eau chaude, c'est le centre qui se gonfle d'abord et non la surface, comme cela devrait se produire si le grain était homogène. Si donc l'on voulait qu'à chaque propriété distincte correspondît un amidon distinct, on serait obligé de considérer chaque grain comme formé de plusieurs couches superposées d'amidons différents : on voit à quelle complication on arriverait, si, pour chaque espèce botanique, il fallait une espèce d'amidon, et si, par surcroît, même pour une plante unique, cette espèce devait être subdivisée en plusieurs variétés. Il vaut mieux renoncer à toute classification, et convenir de déclarer amidon toute substance présentant un certain nombre de caractères tels que les suivants :

1. La composition chimique devra correspondre à la formule $C^6H^{10}O^5$.

2. Le composé devra être insoluble dans l'eau froide et se gonfler dans l'eau chaude en donnant une gelée visqueuse, un *empois* : cet empois devra se colorer en bleu par l'iode.

3. Il sera transformé par une diastase, l'amylase, en maltose, sucre cristallisable.

4. Il sera transformé, par les acides, en glucose.

Quitte à rechercher plus tard, quand nous serons plus avancés, pourquoi tous les amidons ont d'autres propriétés différentes, ou plutôt

pourquoi ils ont ces diverses propriétés communes à un degré différent [1].

Ce que je viens de dire pour l'amidon, je pourrais le répéter pour bien d'autres substances : l'albumine, par exemple, dont le type est le blanc d'œuf, mais dont il existe un nombre immense de variétés (albuminoïdes) dans le règne végétal ou dans le règne animal. Tous ces albuminoïdes ont un certain nombre de propriétés communes très importantes qui les ont fait réunir, à côté de divergences qui assurent leur individualité. La gélatine, la cellulose, la gomme arabique, le caoutchouc, la caséine du lait, peuvent être rangées à côté de l'amidon et de l'albumine. Il est impossible, actuellement, de définir une gélatine pure et d'y ramener, par un traitement convenable, une gélatine quelconque, comme on le fait pour les composés organiques.

Toutes ces substances sont *organisées*. Il ne faut pas chercher dans leur nature chimique quelque chose qui les rapproche et explique leurs ressemblances ; si l'amidon, la cellulose, sont des hydrates de carbone de même composition brute $C^6H^{10}O^5$, l'albumine, la caséine, la gélatine, sont des matières azotées fort complexes, tandis que le caoutchouc est un simple hydrocarbure ne contenant pas d'oxygène. Au point de

1. En effet, ce qui distingue les amidons, c'est qu'ils forment un empois à une température variable de l'un à l'autre ; qu'ils ont un pouvoir rotatoire variable entre certaines limites ; qu'ils sont plus ou moins vite attaqués par la diastase et par les acides ; qu'ils bleuissent plus ou moins par l'iode, etc... Il n'y a que des différences de degré.

vue chimique, les différences sont aussi fortes qu'entre le pétrole, le sucre et la dynamite.

Les ressemblances sont beaucoup plus nettes du côté des propriétés physiques. En effet, le mot *organisé* éveille l'idée de *structure* ; un organisme quelconque présente toujours une structure qui lui est propre. Il faut donc nous attendre à découvrir quelques caractères communs quand nous étudierons de plus près la structure de ces substances que j'appelle organisées. Il y en a un qui nous frappe immédiatement : aucune n'est cristallisable, c'est-à-dire qu'aucune ne peut être obtenue à l'état de cristaux analogues à ceux qui forment les composés minéraux ou les composés organiques.

Nous voici conduits à examiner plus en détail ce que sont ces cristaux. Leur caractère le plus frappant est d'avoir une forme absolument définie [1]. Les faces correspondantes, sur deux échantillons de quartz pur cristallisé, font entre elles rigoureusement les mêmes angles, et il en est de même pour toutes les substances qui cristallisent bien pures. De plus, deux cristaux différents ont la même densité, le même pouvoir diélectrique, les mêmes indices de réfraction, le même pouvoir rotatoire ; en un mot, rigoureusement, les mêmes propriétés physiques.

Certaines lois cristallographiques, qui font dépendre les uns des autres les angles des faces

1. Je ne recherche pas une extrême rigueur, et ne veux pas m'embarrasser de restrictions qui seraient inutiles ici. Aucun liquide n'est incompressible ; mais, quand on veut l'opposer à un gaz, on a le droit de le déclarer incompressible.

entre elles, conduisent à se représenter les cristaux comme formés de particules régulièrement empilées les unes sur les autres. Si nous supposons, pour plus de simplicité, que ces particules sont identiques aux molécules chimiques, nous nous représentons les cristaux comme un empilement de ces molécules, le mode d'empilement étant toujours le même pour une espèce cristallographique déterminée telle que le quartz, la fluorine ou le sel gemme, puisque c'est de ce mode d'empilement que dépend la forme extérieure. Une substance incapable de cristalliser, telle que nos substances organisées, est donc telle que ces empilements réguliers ne se forment pas, probablement parce qu'ils ne peuvent pas se former : ses molécules doivent donc différer des molécules ordinaires.

Celles-ci, d'ailleurs, n'ont pas toutes les mêmes propriétés. Les unes donnent, en se groupant, des cristaux de symétrie élevée, des cubes par exemple : d'autres des cristaux de symétrie très réduite ; c'est-à-dire que les empilements sont plus ou moins réguliers. Si on cherche de quelle propriété de la molécule peut dépendre cette plus ou moins grande régularité, on voit qu'un rôle très important est joué par le degré de complexité de cette molécule, c'est-à-dire le nombre d'atomes dont elle est formée. C'est ainsi que, d'après Retgers, les systèmes cubique et hexagonal, de symétrie élevée, comprennent

85 p. 100 des molécules à un seul atome (éléments).
88 — — deux atomes.
53 — — trois atomes.

40 p. 100 des molécules à quatre atomes.
50 — — cinq atomes.
20 — — plus de cinq atomes.

Ainsi, les molécules simples donnent plus facilement des cristaux symétriques, et ceci doit tenir en partie à ce qu'elles sont elles-mêmes plus symétriques. Pour le montrer, prenons pour point de départ la molécule de l'eau H^2O : nous en diminuerons certainement la symétrie en remplaçant l'un des atomes d'hydrogène par un atome de potassium K pour donner la potasse KOH, de même qu'on diminue la symétrie d'un haltère en remplaçant l'une des boules de fer par une boule de bois. Nous la diminuerons encore si nous remplaçons l'autre atome d'hydrogène par un radical complexe tel que celui de l'acide acétique pour donner l'acétate de potasse $C^2H^3O^2K$. Pour les mêmes raisons, le chloracétate $C^2H^2ClO^2K$ sera encore moins symétrique que l'acétate, etc... Donc, en général, les molécules simples auront une symétrie élevée et la communiqueront aux cristaux qu'elles formeront : les molécules complexes donneront des cristaux peu symétriques, et cette relation, extrapolée, conduit à penser que l'impossibilité de faire cristalliser les substances organisées peut être simplement due à une complexité beaucoup plus grande encore de leurs molécules. Nous allons voir immédiatement que cette supposition est vérifiée en comparant la molécule de l'amidon, que nous avons pris comme type de substance organisée, à celle d'un produit organique de composition très voisine, mais cristallisable, le sucre de cannes.

Celle de l'amidon est, d'abord, beaucoup plus grosse : on ne sait pas de combien, mais il y a des raisons très fortes pour croire qu'elle l'est au moins 50 fois, peut-être 200 ou 1.000 fois plus. Alors que celle du sucre est formée de 45 atomes, celle de l'amidon en contient 2.000 au moins et peut-être 50.000. Ceux-ci ne sont pas disposés d'une façon quelconque : la facilité avec laquelle l'amidon se transforme en sucre — plus exactement, en maltose isomère du sucre — conduit à penser que le maltose existe, sinon tout formé, du moins tout près de l'être, dans la molécule d'amidon. Celle-ci serait alors une grosse pelote formée de molécules de maltose imcomplètes (ayant perdu les éléments de l'eau, puisque c'est en absorbant de l'eau que l'amidon se transforme en maltose) mais que, pour simplifier, j'appellerai cependant des molécules de maltose, puisqu'elles en sont extrêmement voisines.

Cette structure de la molécule d'amidon rend beaucoup plus facile l'explication de ses propriétés. On comprend, par exemple, pourquoi cet amidon n'est pas cristallisable : sa molécule est trop complexe, comme nous avions été conduits à le supposer. Nous venons de voir que déjà une molécule de 6 atomes ne pouvait plus donner que des cristaux presque dénués de symétrie : des molécules de 600 atomes donneront des cristaux entièrement dissymétriques, des empilements irréguliers. Cela ne veut pas dire qu'elle donneront nécessairement des solides entièrement *isotropes* comme du verre (c'est-à-dire, ayant les

mêmes propriétés dans toutes les directions : dans une sphère de verre, aucun procédé physique ne permet de distinguer un diamètre d'un autre), mais simplement que la forme extérieure en sera *quelconque*. Et en effet, en y regardant de plus près, on se trouve conduit à modifier un peu ce que je disais au début : il n'est pas absolument exact de dire que les matières organisées ne sont pas cristallisables, car beaucoup d'entre elles cristallisent, mais dans le *système amorphe*.

Ceci a l'air d'une plaisanterie et demande une explication. Les cristaux ne sont pas uniquement caractérisés par leur forme extérieure, par leurs faces, leurs arêtes et les angles constants que ces faces et ces arêtes font entre elles : ils le sont aussi par leurs propriétés optiques, et notamment par les phénomèmes auxquels ils donnent lieu quand on les observe en lumière polarisée. Or, ils ne sont pas seuls à pouvoir donner ces phénomènes : un certain nombre de liquides présentent, dans certaines circonstances, des apparences identiques, et ceci a conduit à étendre notablement la notion de cristal, et à en faire dépendre la définition beaucoup plus des propriétés optiques que de la forme extérieure : à admettre par conséquent, à côté des systèmes cristallins de la minéralogie, le système amorphe pour tous les corps qui présentent ces propriétés sans avoir de forme géométrique constante. Or, beaucoup de substances organisées, et en particulier l'amidon, appartiennent au système amorphe, car ils donnent, en lumière

polarisée, des phénomènes très voisins de ceux que l'on observe avec les cristaux. La cellulose, autre type de substance organisée, se comporte comme l'amidon, et, par exemple, une fibre de coton qui est de la cellulose presque pure donne, entre deux nicols, des colorations aussi vives que le cristal le mieux défini[2]. Nous sommes ainsi conduits à admettre qu'en prenant l'état solide nos substances organisées peuvent prendre en même temps l'état cristallin, et que seule la complexité de leur molécule empêche que cet état soit décelé par l'existence d'une forme géométrique régulière et toujours la même. Ainsi la propriété de n'être pas cristallisables (au sens ordinaire du mot) s'explique assez naturellement si l'on considère la structure spéciale des corps organisés.

La même considération permet de comprendre les différences qui existent entre une espèce d'amidon et une autre. En effet, la molécule d'amidon n'est pas toujours formée du même nombre de molécules de maltose : toutes les molécules d'amidon ne sont pas de la même grosseur, et il peut y en avoir, on peut même admettre comme certain qu'il y en a de dix fois plus grosses que d'autres. Toutes, cependant,

2. On pourrait croire que ce phénomène tient à la manière dont la fibre de coton se forme. Il n'en est rien, car le coton qui a été nitré, dissous dans l'alcool et l'éther, et filé en soie artificielle, ne donne rien entre les nicols; tandis qu'il suffit de le dénitrer pour qu'il donne des couleurs aussi vives que la fibre naturelle. L'influence de la nature chimique est donc indéniable (De Chardonnet).

sont de l'amidon : si l'on se rappelle que cette substance a été définie comme présentant les quatre propriétés : 1° de donner dans l'eau chaude un empois ; 2° de donner un empois bleuissant par l'iode ; 3° de se transformer en maltose sous l'action de l'amylase ; 4° d'être transformée par les acides en glucose, on verra que tout assemblage de molécules de maltose présentera d'emblée la troisième propriété, et, les acides dédoublant le maltose en glucose, la quatrième. Il présentera aussi presque nécessairement la première, qui lui laisse une grande latitude ; la température de l'eau chaude n'étant pas définie, ce n'est pas une molécule de maltose de plus ou de moins dans une construction qui en comprend déjà 50 qui pourra faire disparaître la propriété de donner un empois, et elle en modifiera tout au plus le degré. Reste la coloration par l'iode : mais elle semble être un effet purement physique, et ce n'est pas une pierre de plus sur un bâtiment qui peut en modifier la couleur.

Il n'y a donc aucune difficulté à se représenter un nombre considérable d'amidons variant par la grosseur de leur molécule : et ceci justifie l'impossibilité déjà reconnue d'une classification, car si certaines de ces molécules se composent de 50 unités maltose, et les autres de 2.000, il faudrait en toute rigueur que la classification comprenne

$$2\,000 - 50 = 1\,950 \text{ variétés d'amidon.}$$

ce qui ne serait pas extrêmement pratique.

J'ai pris, jusqu'ici, l'amidon pour exemple : j'aurais pu tout aussi bien prendre la cellulose, ou la gomme arabique : comme la désagrégation de l'amidon conduit au maltose, celle de la cellulose conduit finalement au glucose, et celle de la gomme à un mélange de deux autres sucres, le galactose et l'arabinose. L'albumine, la caséine, substances l'une ou l'autre très répandues dans les deux règnes végétal et animal, sont, comme les précédentes, des molécules extrêmement compliquées. D'une façon générale, la molécule de substance organisée sera beaucoup plus grosse et plus complexe que celle de la matière minérale ou de la matière organique cristallisable.

Maintenant, comment nous représenter cette grosse molécule ? Est-ce un assemblage fait au hasard, ou bien suivant certaines lois ? Quelle est la force qui l'a produit, quelle est ensuite la force qui le maintient ? Est-il caractéristique de la matière vivante, ou bien pouvons-nous en produire artificiellement qui possèdent la même structure et les mêmes propriétés ? Pour quelle raison, en tout cas, ces matières organisées, même si elles ne sont pas caractéristiques de la vie, sont-elles aussi largement répandues chez les végétaux et chez les animaux ? Il s'en faut de beaucoup que nous ayons une réponse prête et définitive à toutes ces questions, car l'étude de ces matières est très peu avancée ; cependant, quelques résultats méritent d'être signalés.

Commençons par une définition. Comme on le fait maintenant, je désignerai ces grosses molécules des substances organisées par le nom

de *micelles*, afin de les distinguer des molécules ordinaires. Quoique beaucoup plus grosses que ces dernières, elles sont cependant excessivement petites, puisque leur diamètre est le plus souvent compris entre un cent-millième et un millionième de millimètre, de telle sorte que la plus petite masse de matière que l'on puisse imaginer en renferme encore des millions ou des milliards. Cette extrême ténuité a fait qu'elles ont passé longtemps inaperçues : leur existence, déduite tout d'abord par Naegeli de considérations théoriques, n'a été démontrée par l'observation directe que depuis quelques années. Je laisse momentanément de côté la description des méthodes employées dans ce but[1], et me contente pour le moment de dire qu'on a pu rendre les micelles individuellement visibles et mesurer, dans un certain nombre de cas, leur grosseur.

Quoique ces résultats soient déjà très importants, ils sont loin d'être suffisants : parmi les propriétés physiques, la forme et surtout la structure interne des micelles nous échappent. Nous ne savons pas davantage pourquoi elles se forment avec certaines substances plutôt qu'avec d'autres. Pourquoi y a-t-il un amidon de maltose et pas un amidon de saccharose, alors que ces substances sont aussi voisines ? Est-ce l'affinité chimique, ou une force physique, qui a assemblé les molécules et les maintient au contact ? Il n'est même pas sûr que cette ques-

1. Voir l'Appendice, p. 264.

tion ait ici un sens, car à l'heure actuelle il existe de nombreux phénomènes dont on ne peut dire s'ils sont physiques ou chimiques, ou si ce n'est pas par eux que la physique se rejoint avec la chimie.

Passons à la troisième question que nous nous étions posée. Les micelles sont-elles caractéristiques de la matière vivante ? Non, elles ne le sont pas. Les chimistes ont appris à en faire qui, quoique composées d'une façon toute différente, présentent avec les micelles naturelles un grand nombre de ressemblances. Ainsi, si, comme l'a fait Graham, nous mélangeons deux solutions, l'une d'acide chlorhydrique, l'autre de silicate de soude, et si nous débarrassons du chlorure de sodium formé, il nous restera une solution de silice. Dans certaines conditions, par l'addition d'un sel, ou par une élévation de température, cette solution se prendra en une gelée très semblable à une gelée de gélatine, ou à du blanc d'œuf coagulé par la chaleur. Evaporée, elle ne donnera pas de cristaux, mais une sorte de vernis solide transparent et amorphe comme de la gomme arabique. Enfin, — et ceci est plus important pour nous — tandis que les solutions d'acide chlorhydrique et de silicate de soude contiennent des molécules ordinaires isolées au sein de l'eau, la solution de silice contient des micelles, formées d'un grand nombre de molécules de silice unies entre elles par le même lien qui unit les molécules de maltose dans l'amidon. Ainsi, nous savons produire un composé de structure micel-

laire, et ce composé présente de remarquables ressemblances avec la matière organisée naturelle.

Nous arriverions au même résultat et aux mêmes conclusions en substituant, au silicate de soude, du tungstate ou du stannate : la solution finale contiendrait alors des micelles d'acide tungstique ou d'acide stannique. Beaucoup d'autres substances, de composition chimique excessivement variée, pourraient encore être employées : on peut citer par exemple, parmi beaucoup d'autres :

Des éléments : or, argent, platine, soufre, mercure, cuivre.

Des composés de métalloïdes entre eux : sulfures d'arsenic, d'antimoine.

Des oxydes métalliques : de fer, aluminium, chrome, thorium.

Des sulfures métalliques : de zinc, de cadmium, de mercure.

Des composés ternaires : sulfate de baryum, chromate d'argent, ferrocyanure de cuivre, etc...

Il est impossible de découvrir aucune analogie chimique entre tous ces corps : pas une propriété ne leur est commune. Leurs solutions dans l'eau, préparées d'une certaine manière, n'en présentent pas moins ce caractère commun de renfermer, non pas des molécules libres, mais des micelles, et de posséder, en raison de ce seul fait, des propriétés physiques ou physico-chimiques particulières. On a donc pu les réunir en une seule classe : depuis Graham, on les appelle les *colloïdes* et on donne aux solutions

qu'ils forment dans l'eau le nom de *solutions colloïdales*. Une solution colloïdale est une solution qui renferme, non des molécules libres, mais des micelles. Comme telle, elle a un certain nombre de propriétés différentes de celles des solutions ordinaires : et l'expérience montre que ces propriétés sont les mêmes, qu'il s'agisse d'une solution colloïdale naturelle comme le blanc d'œuf ou d'une solution artificielle comme celle de silice.

Par exemple, toutes ces solutions ont ce caractère commun, déjà reconnu chez les substances organisées, de ne pouvoir donner de cristaux définis[1]. La plupart d'entre elles, soumises à un degré suffisant de chaleur, se prennent en masse comme du blanc d'œuf cuit ou du lait caillé. L'alcool les précipite, c'est-à-dire sépare de l'eau le composé colloïdal, comme il en sépare l'albumine ; des sels neutres tels que le chlorure de sodium ou le sulfate d'ammoniaque produisent le même effet. Desséchés, puis remis dans l'eau, ils ne se redissolvent généralement pas, pareils en ceci à l'amidon ou à la gélatine. Ils n'ont pas des propriétés constantes et définies, ni une composition toujours la même, et ceci les rapproche des substances organisées naturelles et les éloigne des composés minéraux ou organiques. Enfin, il serait possible de citer encore d'autres ressemblances d'ordre physico-chimique, ressemblances plus difficiles à expliquer : celles

1. On a décrit l'albumine cristallisée, la cellulose cristallisée ; mais ces matières ne sont pas pures.

que j'ai citées suffisent à faire comprendre que c'est bien à leur structure micellaire que nos colloïdes de synthèse doivent d'être des imitations de la matière organisée naturelle, puisque elle est évidemment, en l'absence de toute analogie chimique, la seule raison qu'on puisse invoquer pour expliquer leurs ressemblances.

La structure micellaire n'est donc pas, en elle-même, caractéristique de la vie, et nous savons la reproduire. Par suite, il n'y a rien d'impossible à ce qu'on fasse aussi bien, un jour, la synthèse des produits organisés que celle des produits cristallisables. Sur cette voie cependant, les chimistes sont beaucoup moins avancés, et l'on peut dire que, à côté de la chimie organique brillamment développée, la chimie organisée est encore à créer de toutes pièces. En ce qui concerne l'amidon, la cellulose, la gomme, presque rien n'est fait. Dans la direction de l'albumine, des résultats assez importants ont été déjà acquis : Grimaux, par exemple, est arrivé de deux manières différentes, en partant de l'acide aspartique ou de l'acide amidobenzoïque, à des colloïdes de synthèse qui, tout en présentant une composition différente de celle de l'albumine, lui ressemblaient par beaucoup de caractères : amorphes comme elle, donnant avec l'eau des solutions claires et un peu visqueuses, précipitables par l'action de certains sels et se coagulant sous l'influence de la chaleur. Dans ces dernières années, le grand chimiste allemand Emile Fischer a réalisé la synthèse des *polypeptides*, composés formés des mêmes éléments que

l'albumine naturelle, présentant des propriétés très voisines, et résultant de la condensation les unes avec les autres des molécules de diverses substances, telles que la leucine, l'alanine, le glycocolle ou l'acide aspartique, qui sont des résidus de la décomposition de cette même albumine, et qu'on suppose y exister à l'état de molécule complète ou presque complète, comme le maltose dans l'amidon. Entre les polypeptides et l'albumine, il ne semble pas que le pas à franchir soit bien grand, et peut-être la synthèse d'une albumine est-elle prochaine[1]. Je dis *une* albumine, parce qu'il y en a un nombre considérable de variétés et qu'on ne peut savoir d'avance laquelle on obtiendra, ni même si celle qu'on obtiendra sera identique à l'une des albumines naturelles.

Ainsi rapprochées des produits de synthèse, les matières organisées ne sont plus que des colloïdes naturels, et c'est désormais ainsi que je les désignerai, les deux mots ayant, comme nous venons de le voir, un sens identique dans les acceptions où nous les prenons. Aucune cellule vivante n'est nécessaire à leur production: il nous reste maintenant à considérer le rapport inverse et à nous demander s'ils ne sont pas, eux, nécessaires à la production d'une cellule vivante. On est amené à le croire si l'on voit combien les colloïdes sont nombreux et universellement répandus chez les êtres vivants. La

1. Dans un roman, M. Daniel Halévy a supposé cette synthèse réalisée industriellement d'une manière très économique et en a discuté la portée sociale.

membrane de la cellule est un colloïde, le contenu de la cellule est lui-même un colloïde, à structure micellaire. Dans les végétaux, l'amidon, qui joue un rôle si important, est un colloïde : la cellulose, qui forme (avec quelques substances voisines) la partie solide du corps, est un colloïde. La partie la plus active, le contenu des cellules de la plante, est une matière albuminoïde mélangée à des sucres et à quelques sels. La sève contient en solution, à côté de sels minéraux, des gommes et d'autres corps colloïdes. Dans le règne animal, il en est de même : le tissu de l'os est un colloïde, l'osséine, imprégné de carbonate et de phosphate de chaux : le sang est une dissolution d'un colloïde, la fibrine, et l'hémoglobine elle-même, chargée de transporter l'oxygène, est peut-être un colloïde. Dans le lait, à la matière grasse et au lactose (sucre de lait) vient s'ajouter, comme matière azotée, la caséine, colloïde parent de l'albumine. Evidemment une aussi grande extension du colloïde, presque totalement absent du règne minéral (l'argile cependant en est un), n'est pas un effet du hasard : elle doit tenir à quelque cause profonde qu'il nous faudra découvrir.

J'ai donné plus haut une liste de quelques corps colloïdaux : j'aurais pu la faire beaucoup plus longue[1]. En la parcourant alors on aurait vu qu'elle ne comprend que des corps *insolubles*

1. Une liste de ce genre vient d'être publiée par Svedberg : elle comprend les noms d'une centaine de colloïdes de la chimie minérale.

dans l'eau à l'état moléculaire, c'est-à-dire ne pouvant exister sous la forme de solution ordinaire. L'eau ne dissout aucune substance de cette liste, pas d'or, ni d'argent, ni de soufre, ni de mercure, ni de fer oligiste qui est de l'oxyde de fer, ni de blende qui est du sulfure de zinc ; c'est-à-dire que, si l'on place dans l'eau des morceaux compacts de blende ou de fer oligiste, ou des lingots d'or et d'argent, il ne s'en dissout aucune trace perceptible. Pour les amener à l'état de solution (mais alors, de solution colloïdale) on est obligé d'employer des moyens détournés : de réduire par exemple un sel d'or par le phosphore, ou de traiter par l'ammoniaque un sel de peroxyde de fer. Mais l'ouvrage qu'on a ainsi fait est facile à défaire, et il suffit généralement de dessécher la solution pour que la matière colloïdale redevienne *complètement* insoluble.

Je suis obligé d'insister sur le mot *complètement*, à cause de la mauvaise habitude qu'ont prise les chimistes d'appeler insolubles tous les corps qui ne se dissolvent pas abondamment : tels que le carbonate de chaux, dont un litre d'eau dissout trois centigrammes, le sulfate de baryum ou le chlorure d'argent dont l'eau prend 2 milligrammes. Ce nom devrait être réservé aux corps colloïdaux, dont un litre d'eau ne dissout généralement pas plus de $\frac{1}{1.000}$ de milligramme. La différence peut ne pas paraître grande, si l'on envisage le poids de matière contenu dans un litre d'eau : elle devient immédiatement plus sensible si l'on pense qu'il faudra

dans le premier cas, pour dissoudre un gramme de chlorure d'argent, 500 litres d'eau seulement, et 1.000 mètres cubes au moins pour dissoudre le même poids d'un colloïde.

Ceci nous fait découvrir une première raison, fort simple, pour que certains organismes soient formés de colloïdes ; l'insolubilité est, pour eux, une condition absolue d'existence. On ne conçoit pas des poissons dont le corps serait soluble dans l'eau. On le conçoit encore moins pour des microbes, qui devraient, étant données leurs petites dimensions, fondre très rapidement dans l'eau s'ils y possédaient une solubilité quelconque. La membrane extérieure de leur corps tout au moins doit résister indéfiniment à l'eau, et il faut pour cela qu'elle soit presque rigoureusement insoluble, car les microbes se trouvent souvent en contact avec des quantités d'eau énormes ; par exemple, dans une expérience de Trenkmann, des bacilles tuberculeux ensemencés au nombre de 1.600 par centimètre cube se sont maintenus en vie, quoique dans cette expérience un gramme de microbes (supposés secs) fussent en suspension dans un océan de dix mille mètres cubes d'eau, à laquelle ils présentaient une surface d'attaque de dix mètres carrés.

Cette insolubilité nécessaire ne prouve pas, à elle seule, que la membrane doive être de nature colloïdale, car un corps de microbe entouré d'une feuille d'or battu (qui n'est pas colloïdal du tout), résisterait aussi bien à l'eau. Mais — sans parler ici du fait que la peau du microbe doit être perméable à l'eau et à certains sels, propriété que

ne possède pas la feuille d'or — cette membrane est une production du microbe ; or, toutes les fois qu'il y a dans une réaction chimique production d'un composé réellement insoluble, à moins que la réaction ne soit extraordinairement lente (ce qui n'est pas le cas ici), les molécules de ce composé s'unissent pour former des micelles et le composé se présente sous la forme colloïdale [1], soit qu'il reste ainsi en solution, soit qu'il prenne immédiatement la forme solide amorphe. Ainsi la membrane insoluble, et tissée par le microbe, ne peut être qu'un colloïde.

Pour les animaux et les végétaux supérieurs, la même raison d'insolubilité n'existe pas ; pourvu qu'ils soient formés de matériaux peu solubles, jamais ils ne viendront en contact avec une quantité d'eau suffisante pour leur porter atteinte. Mais il y a pour eux une autre raison du même genre, que nous pourrions appeler une raison de bon sens, pour qu'ils soient formés de colloïdes : il faut qu'ils soient à la fois mécaniquement résistants et doués d'une certaine souplesse, et les animaux, en particulier, doivent pouvoir remuer. Or, l'invariabilité de la matière cristallisée leur rendrait les mouvements bien

1. Ceci est très général et s'applique encore dans le cas de milieux autres que l'eau. On peut, en effet, obtenir des colloïdes dans d'autres liquides ; jamais on ne les obtient qu'avec des substances insolubles. Comme les solubilités sont très variables d'un liquide à l'autre, un même corps peut très bien exister à l'état de solution ordinaire dans un liquide, à l'état de solution colloïdale dans l'autre ; c'est ainsi que le sel ordinaire a pu être obtenu à l'état colloïdal dans la benzine ou le toluène qui ne le dissolvent pas (Paal).

difficiles. Cette matière est compacte : elle correspond, pour toutes les substances, à la densité maxima, c'est-à-dire que les molécules y sont le plus près possible les unes des autres, et, d'ailleurs, dans une position presque invariable. Il en résulte en général une grande dureté et une grande cohésion, mais aussi une grande fragilité. Que l'on suppose la feuille d'un arbre tenue à la branche par un pétiole formé de substances cristallisées ; à moins que ce pétiole ne soit beaucoup plus gros que celui que nous connaissons, il sera brisé par le premier coup de vent arrivant normalement à la feuille, au lieu d'être seulement tordu.

Le colloïde organisé n'a pas la même dureté ni la même ténacité que le cristalloïde, mais, ce qu'il perd de ce côté, il le regagne, et au delà, en souplesse. Il est facile de le comprendre : les micelles, qui remplacent les molécules, sont placées les unes par rapport aux autres dans des positions sinon quelconques, du moins susceptibles d'un certain jeu ; elles n'ont plus les unes par rapport aux autres la même fixité que les molécules d'un cristal ; comme elles n'ont pas toutes la même orientation, le solide qu'elles forment n'a pas de ces plans de clivage qui donnent aux cristaux une grande fragilité et font que le carborundum par exemple, malgré son extrême dureté, se pulvérise très aisément, tandis qu'un morceau de liège ou un fanon de baleine supportent des chocs très violents sans se désagréger. La cohésion qui unit les micelles, sans être d'une essence différente de la cohésion qui unit les mo-

lécules cristallines, leur permet de s'écarter à une beaucoup plus grande distance sans rupture : peut-être même les micelles sont-elles déformables. Sans aller jusqu'au caoutchouc qui est une substance organisée vraiment extraordinaire, incompréhensible même, mais qui paie son élasticité par une très forte diminution de la résistance à la traction (ténacité), comparons un arc en bois avec un arc de dimensions identiques, mais taillé dans un roc : alors que le premier se pliera de 50 centimètres et résistera à des chocs extrêmement violents, le second pliera de quelques millimètres et ne pourra tomber à terre sans se rompre. Que dans notre squelette, où la matière organisée, l'*osséine*, ne forme pourtant que le quart du poids total, cette osséine vienne à disparaître, et nos os deviendront fragiles comme du verre[1] ; que les cartilages, eux aussi, cristallisent, et nous ne pourrons plus descendre d'omnibus sans que le choc de notre pied par terre, n'étant plus amorti, nous fende le crâne.

Enfin, il y a une troisième raison, moins évidente celle-là, pour que les tissus vivants soient formés de colloïdes pour la plus grande partie. Cette raison ne vaut que pour les tissus tels que nous les avons sous les yeux, et il est certainement possible de concevoir des êtres auxquels elle ne s'appliquerait pas ; mais la chimie n'a pas

1. Dans certaines maladies, c'est la partie minérale qui disparaît, et l'os devient ainsi très fragile. Il n'y a pas contradiction avec ce que je dis, car, dans ces cas, la partie organisée est aussi profondément altérée.

à se préoccuper de ces êtres, et s'en tient à ceux qui existent. Or ceux-ci, tels qu'ils sont, ne peuvent fonctionner sans dommage que si leurs tissus présentent certaines propriétés inséparables de leur nature organisée ou colloïdale. Il suffit, pour s'en rendre compte, d'examiner d'un peu près comment se font les échanges des cellules avec le milieu extérieur.

Tout, dans les organismes, s'effectue par voie de diffusion. Une cellule n'a pas de porte sur l'extérieur ; tout ce qu'il lui faut, elle le reçoit à travers ses murs, par diffusion ; elle ne peut faire commerce que de matières dissoutes. Les matériaux qui constituent la cellule sont donc formés, nécessairement, par les réactions des matières dissoutes absorbées, soit entre elles, soit avec les substances qui existaient auparavant dans la cellule. Ces dernières ne doivent pas pouvoir sortir, sans quoi les réactions d'assimilation s'effectueraient aussi bien au dehors qu'en dedans et la croissance ne se ferait pas. (Si par exemple la chlorophylle d'une algue pouvait passer dans l'eau où vit cette algue, avec tout ce qui l'accompagne, l'assimilation du carbone se ferait dans l'eau et non pas dans l'algue, qui ne se développerait pas). Or, toutes les substances actives d'une cellule doivent être dissoutes, en raison de ce vieil axiome que ce qui n'est pas dissous n'agit pas : *corpora non agunt nisi soluta*. Il faut donc que la membrane cellulaire ait la double propriété de laisser passer certaines substances dissoutes — les aliments — et d'en arrêter d'autres — les aliments élaborés et devenus partie cons-

tituante de la cellule. — Elle doit se comporter comme une sorte de filtre intelligent.

Une membrane de cette nature serait bien difficilement réalisable à l'aide d'éléments cristallisés, ou, pour employer l'expression de Graham, *cristalloïdes*. On ne voit guère d'autre moyen que celui qui consisterait à envelopper la cellule d'une sorte de bougie Chamberland formée de porcelaine poreuse; il faudrait, pour cela, une multitude de cristaux enchevêtrés, une sorte de papier-filtre dont les éléments seraient des aiguilles cristallines au lieu d'être des fibres végétales. Une telle disposition est assurément possible, et la preuve en est fournie par le plâtre qui, une fois pris, possède à peu près cette texture et est perméable à l'eau. Mais pour qu'une semblable cloison laisse passer certaines substances et en retienne d'autres, il faut que le diamètre des pores, et par suite aussi celui des cristaux, soient comparables aux dimensions moléculaires; il faut que les cristaux aient une épaisseur voisine du millionième de millimètre, et nous ne connaissons pas de circonstances dans lesquelles il se forme des cristaux aussi petits. Ceux que l'on observe — plâtre dans le règne minéral, oxalate de chaux dans les plantes, urates chez l'homme, etc.), sont au moins mille fois plus gros en diamètre.

Au contraire, la structure micellaire se prête à merveille à ce rôle de tamis, puisque les micelles sont elles-mêmes de petites masses plus grosses que les molécules, mais de dimensions encore comparables. On comprend très bien qu'une

membrane colloïdale, formée par la juxtaposition d'un nombre immense de ces micelles unies par la cohésion, joue le rôle de *filtre à molécules*, de même que du sable fin peut jouer le rôle de filtre par rapport aux sédiments ou aux microbes en suspension dans l'eau. Une telle membrane aura donc, de par sa seule texture, la propriété d'être perméable à certaines substances (en général de petites dimensions, c'est-à-dire de poids moléculaire peu élevé) et imperméables à d'autres, et surtout à celles qui ont de grosses molécules[1], d'être *semi-perméables*, pour employer le mot actuellement en faveur.

Que la semi-perméabilité soit effectivement sous la dépendance de la structure micellaire, c est ce qui résulte de deux ordres de faits. D'abord, toutes les membranes de l'organisme sont, à un plus ou moins haut degré, semi-perméables. La plupart laissent passer les composés minéraux simples, parmi lesquels le plus important pour les animaux est le chlorure de sodium, et arrêtent les composés organiques complexes. Par exemple, les membranes qui séparent, dans le rein, l'urine du sang, sont normalement perméables au sel et imperméables au glucose ; quoique ce sucre existe toujours dans le sang, et surtout pendant la digestion, ce n'est que dans le cas de diabète

1. Il n'est pas certain que la membrane agisse seulement ainsi, mécaniquement. Bien des physiologistes et physico-chimistes pensent qu'elle agit aussi en vertu de phénomènes de dissolution. Cette question est fort embrouillée, et il n'est même pas sûr que la distinction ait un sens. Quand on parle de molécules, il devient bien dangereux de vouloir décider ce qui est mécanique, physique ou chimique.

sucré qu'il passe dans l'urine. Beaucoup de membranes végétales sont, elles aussi, imperméables au sucre ; sans cela, les betteraves abandonneraient le leur aux eaux de pluie ou du sol. Enfin, d'une façon générale, une membrane vivante quelconque est presque rigoureusement imperméable aux solutions de colloïdes, dont les micelles sont trop grosses pour pouvoir s'y faufiler. Cette dernière propriété est d'ailleurs presque évidente : il ne faut pas que le contenu de la cellule, contenu formé en majeure partie de colloïdes, puisse sortir de cette cellule. Lorsqu'il en sort, on peut présager un trouble assez sérieux : c'est ce qui arrive, par exemple, quand l'albumine passe dans l'urine.

Les membranes colloïdales naturelles étant ainsi reconnues semi-perméables, il nous reste à voir si la même propriété s'étend aux membranes artificielles. Il en est bien ainsi, et cette propriété n'est aucunement caractéristique de la matière vivante. Des expériences très intéressantes de Traubè ont montré qu'une membrane de ferrocyanure de cuivre par exemple, perméable au sel marin ou au sulfate d'ammoniaque, était imperméable au sucre. La même propriété a été reconnue à des membranes de constitution toute différente telles que celles du tannate de fer. Ainsi il n'y a pas de doute qu'elle dépend surtout de la texture micellaire, et, à un beaucoup plus faible degré, de la nature chimique des micelles.

Je note en passant, comme un phénomène curieux et encore bien mal expliqué, que la mort

de la cellule paraît changer la perméabilité de la paroi. La membrane d'une cellule morte se laisse, en général, plus facilement traverser que celle de la cellule vivante, et, pour reprendre l'exemple qui nous a servi tout à l'heure, une betterave tuée par la chaleur laisse échapper son sucre par diffusion beaucoup plus facilement qu'une betterave fraîche.

Il me reste à justifier, dans les limites où on est en droit de le faire, la distinction entre la matière organique et la matière organisée en tant que devant être étudiées, l'une par la chimie, l'autre par la biologie. Cette distinction n'est plus soutenable si l'on n'envisage que la nature chimique des substances, puisque rien ne s'oppose, comme nous l'avons vu, à ce qu'on fasse la synthèse des unes aussi bien que celle des autres. Mais les difficultés commenceraient si l'on voulait aller plus loin.

Nous n'apercevons pas de difficulté théorique qui nous empêche d'arriver à l'amidon par exemple. Mais l'amidon, substance chimique, est une chose, et le grain d'amidon, produit de la vie, en est une autre. Il a une forme : il est composé de couches concentriques de propriétés différentes, inégalement attaquées par l'eau chaude ou par les diastases. Ces diverses couches n'ont pas été toutes disposées dans les mêmes conditions ; les unes peut-être l'ont été de jour, les autres la nuit; les unes en présence d'un excès d'eau, les autres pendant une période de sécheresse. Pour bâtir un grain d'amidon, il faudra connaître toutes ces

conditions, trouver le moyen de les réaliser et de les faire agir successivement. Or, il n'est pas du tout sûr que ces conditions soient réalisables en dehors de la plante, ou, si l'on veut, *par un mécanisme plus simple que la plante*. Il se pourrait fort bien que la synthèse du grain d'amidon ne pût être obtenue que comme une conséquence de la synthèse de la plante avec toutes ses fonctions. Or, quoiqu'on ait voulu expliquer par des forces physiques ou chimiques les apparences les plus compliquées de la cellule, telles que celles de sa division en deux (figures de karyokinèse), les explications données jusqu'à ce jour ne sont que de purs enfantillages et ne nous apprennent rien, que la naïveté de leurs auteurs. Quand on réfléchit aux difficultés que présentera la construction d'un grain d'amidon, pourtant bien simple en apparence, on se demande si vraiment on arrivera un jour à bâtir un mécanisme aussi complexe et à le faire tenir dans un espace de moins d'un dixième de millimètre.

Même si l'on arrivait à faire isolément la synthèse de toutes les substances qui entrent dans la composition d'une cellule, il serait bien plus difficile d'obtenir que leur mélange évolue comme cette cellule. Pour expliquer la vie d'un animal ou d'une plante, il semble bien qu'il faudra toujours remonter, si peu que ce soit, dans son histoire, c'est-à-dire avoir recours à la biologie. Le propre des réactions chimiques est de ne dépendre à chaque instant que de l'état présent du système, et non du chemin suivi pour y arriver; il semble difficile que cette règle s'applique sans

modification aux réactions complexes, et de plus héréditaires, de la vie. La chimie n'est guère en état de disputer à la biologie l'étude des substances naturelles organisées, en tant que possédant une forme ou constituant des mélanges doués de propriétés définies et stables ; elle reprend ses droits quand la dernière trace de vie est éteinte, et quand toutes ces substances sont isolées. Ainsi elles ne peuvent être vues sur toutes leurs faces d'un seul des deux domaines voisins, mais, suivant ce qu'on veut en voir, il faut se placer d'un côté ou de l'autre.

CHAPITRE VIII

LA SYNTHÈSE VÉGÉTALE. LA CATALYSE

Comme nous l'avons vu en étudiant la fonction chlorophyllienne, les premiers produits de l'assimilation végétale paraissent à peu près uniformes dans toutes les familles botaniques. Un nombre immense de plantes contiennent de l'amidon, ou des sucres, ou des composés analogues que les chimistes rangent sous le nom d'*hydrates* de carbone, parce que leur composition brute s'exprime par un certain nombre d'atomes de carbone plus un certain nombre de molécules d'eau :

$C^6H^{12}O^6$	glucose, lévulose, etc.
$C^6H^{10}O^5$	amidon, gomme, cellulose, inuline.
$C^{12}H^{22}O^{11}$	saccharose, maltose.

Ces produits se transforment assez facilement les uns dans les autres, et nous avons été amenés à conclure qu'ils résultaient de la polymérisation du plus simple d'entre eux, l'aldéhyde formique CH^2O.

A cette simplicité et à cette uniformité des premiers échelons de la synthèse végétale s'oppose la complexité et la très grande variété des

produits définitifs de l'assimilation. La collection des produits chimiques de la Nature est d'une grande richesse, et cette richesse semble surtout extraordinaire quand on songe que ces produits proviennent tous des mêmes matières premières très simples (eau et acide carbonique) par un même procédé très simple aussi, l'action de la lumière solaire. Une seule plante, le pavot, contient, à côté de beaucoup d'autres substances, onze alcaloïdes : morphine, codéine, narcéine, thébaïne, narcotine, papavérine, laudanine, laudanosine, codamine, cryptopine, protopine. Plus riche encore, l'écorce de quinquina en renferme treize, et un nombre égal de principes de nature différente. Au total, les substances organiques actuellement isolées des plantes à l'état de pureté et caractérisées de façon certaine, se comptent par milliers, et nous ne connaissons que les plus importantes.

On ne peut pas prétendre connaître le fonctionnement chimique des cellules végétales si l'on n'a pas trouvé le secret de cette extrême diversité, qui vient à l'encontre de toute vraisemblance, puisqu'il semblerait que toutes les plantes doivent faire le même travail. Ce secret n'est pas découvert, et au contraire, plus on examine de près ce qui se passe, et plus on rencontre de particularités inexplicables dans l'état actuel de nos connaissances; plus aussi on trouve de différences entre ce que les plantes font et ce que nous pouvons faire. Ceci ne peut être montré clairement que par des exemples, car il s'agit ici de différences précises et matérielles.

Le suc du citron renferme à peu près 10 p. 100 d'un acide, l'acide citrique ; un hectare de terrain, dans un sol et avec des procédés de culture convenables, peut produire assez de citrons pour donner facilement 10.000 kilos de cet acide (en supposant qu'on n'en perde pas pendant les opérations). Le rendement, comme on le voit, est considérable. Il paraît encore meilleur si on le compare au travail total de l'assimilation, car la formation de l'acide citrique représente probablement la moitié de ce travail, et, en tout cas, plus de la moitié si on ne tient compte que de ce qui est utilisé à la production du fruit. Le procédé chimique qu'emploie la nature pour arriver à ce résultat est donc excellent, puisqu'elle arrive à transformer l'acide carbonique et l'eau, qui sont ses seuls aliments, en un produit de constitution compliquée, avec autant de facilité que s'il s'agissait d'un produit beaucoup plus simple, et presque sans sous-produit. Voici donc un premier caractère à noter : un rendement très élevé.

J'ai dit que l'acide citrique est de constitution assez compliquée. Sa composition chimique s'exprime par la formule $C^6H^8O^7$; sa molécule contient donc 21 atomes, et ces atomes sont disposés de manière à former une fonction alcool et trois fonctions acide. Quoique cette quadruple condition restreigne considérablement le nombre de composés possibles correspondant à cette formule (nombre qui sans cela serait de plusieurs centaines), il y en a encore une quinzaine qui y satisfont, sans compter les isomères stéréochimiques qui porteraient vraisemblablement le total

à près de trente. Ainsi, il y a trente substances possédant la même composition que l'acide citrique et les mêmes fonctions. Il est remarquable que la plante ne s'y trompe pas ; elle produit l'un des trente, et si par erreur elle forme quelques molécules d'un autre, elles sont si peu nombreuses qu'elles ont, jusqu'ici, passé inaperçues. Le travail de la plante est donc absolument *sûr*.

Ce travail s'accomplit à température constante (car les variations de température diurnes ou annuelles sont plus nuisibles qu'utiles, et les plus belles plantes s'épanouissent dans les régions tropicales, à température presque invariable) et sans l'intervention d'aucun réactif extérieur (le poids de la graine étant insignifiant vis-à-vis du poids d'acide produit) ni d'aucune influence extérieure autre que celle de la lumière. La chimie végétale est donc *simple*.

Il n'y aurait là rien de remarquable si de hauts rendements, la simplicité et la sûreté étaient choses courantes dans les transformations des corps organiques. Mais il n'en est rien, et, au contraire, lorsque ces transformations s'effectuent au laboratoire, elles s'éloignent tellement de ce triple caractère qu'elles nous le rendent presque incompréhensible. Il suffit, pour s'en rendre compte, d'examiner la liste des opérations qui nous sont nécessaires pour aboutir au même point que la plante (à l'acide citrique) en partant, comme elle, de l'acide carbonique et de l'eau. Voici l'un des chemins que l'on peut suivre (synthèse de Grimaux) :

Une partie de l'acide carbonique, réduite à 300° par l'hydrogène, donnera du formène CH^4. Une autre partie, réduite à un moindre degré, donnera de l'oxyde de carbone CO qui, se combinant à un volume égal de chlore, se transformera en oxychlorure de carbone $COCl^2$.

Le formène et l'oxychlorure de carbone, réagissant l'un sur l'autre, donneront le chlorure d'acétyle $CH^3—COCl$, que l'eau transformera en acide acétique $CH^3.CO^2H$.

L'acétate de chaux, distillé, dégagera de l'acétone $CH^3—CO—CH^3$ que nous réduirons par le sodium à l'état d'alcool isopropylique $CH^3—CHOH—CH^3$.

L'action successive du chlorure de zinc, du chlorure d'iode et du chlore, puis encore du chlorure d'iode, nous mènera de cet alcool à la trichlorhydrine $CH^2Cl—CHCl—CH^2Cl$, d'où nous passerons, par un long chauffage en vase scellé au contact de l'eau, à la glycérine $CH^2OH—CHOH—CH^2OH$.

La glycérine, traitée par le chlorure de soufre, formera la dichlorhydrine, que nous oxyderons par l'acide chromique à l'état de dichloracétone $CH^2Cl—CO—CH^2Cl$. L'action successive du cyanure de potassium et de l'acide chlorhydrique nous mènera à l'acide dichloracétonique que nous saturerons par le carbonate de soude, soumettrons de nouveau à l'action du cyanure de potassium et de l'acide chlorhydrique pendant vingt-quatre heures à la température de l'ébullition, avant d'arriver à l'acide citrique.

On voit que ce procédé ne peut aucunement

prétendre à la simplicité. Il ne saurait davantage prétendre à un haut rendement : quoique celui-ci, à partir des éléments, soit bien difficile à déterminer, il doit être bien faible, car Grimaux indique que pour une opération unique (oxydation de la dichlorhydrine) il est de 15 p. 100 seulement. Au total, il n'est probablement pas supérieur à 0,1 p. 100, c'est-à-dire que, pour obtenir 1 kilo d'acide citrique, nous nous embarrasserons de mille kilos de produits secondaires inutilisables. Toutefois, il ne serait pas juste de se fonder, pour apprécier les rendements de la synthèse organique, sur ce cas unique, car le but de Grimaux était de préparer l'acide citrique en quantité suffisante pour pouvoir le caractériser nettement, et nullement de rechercher les meilleures conditions pour l'obtenir. A ce point de vue des rendements, nous trouverons un bien meilleur exemple dans un produit de synthèse industrielle comme l'indigo [1] : quoiqu'il ne s'agisse pas ici d'une synthèse totale, mais de la préparation de l'indigo à partir de substances organiques déjà complexes (le toluène C^7H^8 par exemple, ou la naphtaline $C^{10}H^8$) le rendement

1. Contrairement à l'acide citrique, l'indigo n'est pour la plante qu'un produit accessoire, constituant au plus 2 p. 100 de la substance sèche. Le travail de l'*Indigofera* n'est pas aussi soigné que celui du citronnier ; l'indigo brut renferme, à côté de l'indigotine, une quantité allant jusqu'à 15 p. 100 d'un isomère, l'indirubine. Il y a peu de cas où la différence entre la synthèse vitale et la synthèse chimique s'affirme aussi nettement que dans celui de l'acide citrique : aussi pourra-t-on m'objecter que mon exemple est mal choisi. Je ne le crois pas cependant : mais pour des raisons qui ne peuvent trouver place ici.

des opérations entre le toluène et l'indigo ne dépasse pas 20 p. 100, car il faut encore environ 4 kilos de toluène pour obtenir 1 kilo d'indigo, alors qu'on en aurait 5 k. 600 si la transformation était totale. Il s'agit ici, je le répète, d'une opération étudiée industriellement au point de vue du rendement qui est ici l'élément essentiel : ce chiffre de 20 p. 100 représente donc le mieux que la chimie organique puisse faire actuellement, et il est encore très faible. Admettons que pour l'acide citrique nous puissions faire aussi bien (ce qui est difficile, le nombre d'opérations successives était bien supérieur) : nous serons encore très loin des résultats que donne la plante.

On voit de plus combien notre procédé de synthèse est différent du sien. Parcourons la liste des réactifs nécessaires à la synthèse de l'acide citrique : nous y trouverons le chlore, le sodium, les chlorures de zinc et d'iode, l'acide chromique, le cyanure de potassium. Pour l'indigo, nous aurions besoin de soude caustique, d'acide sulfurique concentré, d'acide nitrique, de chlore, de chlorure d'aluminium, et, dans les deux cas, nous devrions faire intervenir tous les degrés de chaleur, de la température ordinaire aux 3.500° du four électrique. La plante ne se sert ni de ces réactifs, dont la plupart la détruiraient immédiatement, ni de ces températures qui la brûleraient. Les procédés artificiels du même genre que ceux qui conduisent à l'acide citrique et à l'indigo (c'est-à-dire la très grande majorité) sont donc totalement différents de ceux qu'emploie la

nature : ils ne nous apprennent rien sur le fonctionnement des êtres vivants, qui opèrent d'une tout autre manière. Comme c'est l'ensemble de ces procédés, industriels ou purement scientifiques, qui est appelé la *chimie organique*, nous aboutissons nécessairement à cette conclusion que la chimie organique ne nous explique en rien les organismes. Elle suit des voies différentes, desquelles nous n'apercevons pas celles que suit la nature et qui seules nous intéressent ici. Pour les découvrir, nous devons regarder d'un autre côté.

Le mot de catalyse a été inventé par Berzélius, à une époque où les chimistes savaient le grec, pour désigner un ensemble de phénomènes inexplicables au moment où il écrivait, et encore mal expliqués, d'ailleurs, à l'heure actuelle. L'un de ces phénomènes est la décomposition de l'eau oxygénée par la mousse de platine ou le bioxyde de manganèse.

L'eau oxygénée ou peroxyde d'hydrogène H^2O^2 est, par elle-même, un corps parfaitement stable ; pure et enfermée dans un flacon de verre paraffiné, elle se conserve indéfiniment. Au contraire, elle se décompose au contact de la mousse de platine (qui est simplement du platine divisé) ou du bioxyde de manganèse, ou d'autres corps encore, avec une très grande rapidité, et même avec une sorte d'explosion si elle est suffisamment concentrée. Il se dégage de l'oxygène et il reste de l'eau

$$H^2O^2 = H^2O + O$$

La platine, ou l'oxyde de manganèse, restent entièrement inaltérés ; ils ont agi par leur seule présence. On ne peut donc voir là une réaction chimique ordinaire, et d'ailleurs, quand on examine la liste des corps qui peuvent exercer sur l'eau oxygénée cette action décomposante (platine, bioxyde de manganèse, sesquioxyde de fer, charbon, etc...) on ne voit pas quelle propriété chimique pourrait être commune à tous.

On connaît un grand nombre de réactions très semblables à cette décomposition. Ainsi, l'oxyde de manganèse, sans subir lui-même aucune altération, décompose à une température peu élevée le chlorate de potasse en chlorure de potassium et oxygène

$$ClO^3K = KCl + O^3$$

C'est un procédé classique de préparation de l'oxygène, que beaucoup de lecteurs pourront retrouver au fond de leurs souvenirs.

La glycérine décompose de même l'acide oxalique en acide formique et acide carbonique

$$C^2O^4H^2 = CO^2H^2 + CO^2$$

L'acide sulfurique ou l'iodure d'éthyle décomposent l'alcool ordinaire en éther ou en eau : la silice précipitée exerce une action plus énergique, vers 280°, et donne de l'eau et de l'éthylène, toujours par sa seule présence.

$$C^2H^6O = C^2H^4 + H^2O$$

D'autres actions portent sur des corps de cons-

titution plus compliquée : ainsi le chlorure d'aluminium, ajouté à un mélange de chloroforme et de benzine chauffé vers 60°, donne de l'acide chlorhydrique et du triphénylméthane

$$CHCl^3 + 3\,C^6H^6 = CH(C^6H^5)^3 + 3\,HCl$$

Bref, il existe un très grand nombre de réactions de cette espèce, auxquelles, depuis Berzélius, on donne le nom de *réactions catalytiques* ou de *catalyses* [1]. Il ne faut pas oublier que ce nom correspond à une classification, et nullement à une explication, ni par conséquent dire, comme on l'a fait, que la décomposition de l'eau oxygénée est due à la *force catalytique* de la mousse de platine, parce que cette expression ne signifie absolument rien.

Si nous étudions de plus près ces actions catalytiques, nous ne tarderons pas à constater deux caractères très importants pour nous. D'abord, nous verrons que le rôle des catalyseurs consiste très souvent à rendre possible, à la température ordinaire (ou du moins à une plus basse température) des réactions qui ne se produiraient spontanément qu'à température élevée. L'eau oxygénée par exemple, suffisamment chauffée, se décomposerait en eau et oxygène ; la mousse de platine abaisse de quelques centaines de degrés la température à laquelle se fait la réaction.

1. Je rappelle que la fermentation alcoolique a été, pendant longtemps, considérée comme une catalyse. — Pour plus de détails, je renvoie à une conférence de M. L.-J. Simon devant la Société chimique, le 4 juillet 1903.

L'oxyde de manganèse abaisse, de même, la température de décomposition du chlorate de potasse: cette décomposition se produirait sans lui, si l'on chauffait plus fort. L'acide oxalique, soumis à la distillation sèche, donne de l'acide carbonique et de l'acide formique, comme il le fait à moins haute température en présence de glycérine. Un mélange d'oxygène et d'hydrogène peut être chauffé à 500° au moins, sans qu'il y ait combinaison ; celle-ci se produit à 60° en présence de mousse de platine ou d'amiante platinée. L'oxyde de carbone, à 350°, en présence de nickel, donne de l'acide carbonique et du carbone :

$$2CO = C + CO^2$$

dans ce cas le catalyseur se montre particulièrement actif, et diminue de près de 1.000° la température nécessaire à la réaction.

Ainsi, en résumé, nous voyons que dans bien des cas l'emploi d'un catalyseur permet de réaliser, à basse température, une transformation qui exigerait, en son absence, un degré de chaleur beaucoup plus élevé. C'est là un premier caractère de ces actions catalytiques, et j'y insisterai tout à l'heure. Auparavant, je dois en mentionner un deuxième (dépendant du premier dans une certaine mesure) : l'emploi d'un catalyseur, à une certaine température, peut rendre incomparablement plus rapides les réactions qui se produiraient sans lui à cette même température. Ainsi, le phosphore blanc se transforme, vers 250°, très lentement en phosphore rouge ;

l'addition d'une faible quantité d'iode (le catalyseur ici est l'iodure de phosphore) rend la transformation, à la même température, beaucoup plus rapide. Le sucre est, à la température ordinaire, attaqué par l'eau et transformé en sucre interverti, mais avec une extrême lenteur : car l'inversion ne serait à moitié accomplie qu'en 1.500 ans environ. L'addition de 1 p. 100 d'acide chlorhydrique, agissant ici comme catalyseur, rendra la réaction un million de fois plus rapide. De même, l'addition d'acide chlorhydrique à un mélange d'alcool et d'acide acétique favorisera l'éthérification, c'est-à-dire la transformation de ce mélange en éther acétique et en eau.

Or, ce double caractère de se faire à la température plus basse et avec une plus grande vitesse, fait que les catalyses se rapprochent, beaucoup plus que les réactions chimiques ordinaires, des actions vitales. Ce que nous reprochions tout à l'heure aux procédés chimiques, c'était de nécessiter l'intervention de réactifs puissants et de températures élevées. Or, par l'emploi de catalyseurs, nous échappons à ce deuxième reproche, et même, dans certains cas, au premier. Si nous connaissions tous les catalyseurs, certains phénomènes qui nous semblent difficilement explicables cesseraient de nous étonner. Par exemple, quoi de plus surprenant que l'assimilation de l'azote libre par certaines plantes ou par certains microbes, quand on sait l'inertie chimique complète de l'azote à la température ordinaire ? L'intervention d'un catalyseur permettrait au contraire de l'expliquer très aisément,

puisque l'oxygène et l'azote s'unissent spontanément au-dessus de 2.000° pour former l'oxyde azotique NO et, en présence d'un excès d'oxygène, le peroxyde d'azote NO^2, qui se décompose, au contact de l'eau, en acides nitreux et nitrique. La présence du nickel abaisse de 1.000° la température de décomposition de l'oxyde de carbone ; doublons ce chiffre pour un catalyseur plus parfait, et nous ne trouverons plus extraordinaire que l'azote et l'oxygène, dissous tous deux dans l'eau, puissent se combiner sous l'influence de ce catalyseur et donner, à la température ordinaire, de l'acide nitrique. Assurément, l'azote et l'oxygène ont peu d'affinité l'un pour l'autre ; mais il existe des catalyseurs qui combinent à la température ordinaire le soufre et l'hydrogène, dont l'affinité mutuelle est encore moindre [1].

De même l'action d'un catalyseur peut expliquer la marche rapide d'une réaction très paresseuse : par exemple, la formation rapide des huiles ou des graisses dans les graines oléagineuses (maïs, ricin, olive, etc.), formation difficilement concevable d'une autre manière, car ces huiles sont formées de glycérine et d'acides gras, dont l'union ne se produit qu'avec une

1. D'après Lœw et Aso, le noir de platine pourrait combiner à la température ordinaire l'azote et l'oxygène en acide nitrique. Il semble donc que l'existence du catalyseur à acide nitrique ne soit plus une hypothèse. Toutefois, ces expériences sont si délicates qu'on ne peut rien affirmer de manière définitive. Si j'ai pris l'acide nitrique pour exemple, ce n'est pas que je veuille affirmer qu'il se produit ainsi, ni même qu'il soit le premier produit de l'assimilation de l'azote : c'est seulement pour montrer que l'intervention d'un catalyseur rend possible une réaction impossible sans lui.

lenteur excessive. L'intervention d'un catalyseur (et on en connaît qui jouent effectivement ce rôle) rendant la réaction beaucoup plus vive, est ici aussi très vraisemblable.

Il est vrai que si l'on parcourt la liste des catalyseurs que nous connaissons, et en particulier de ceux que j'ai cités, on s'aperçoit de suite qu'il n'en existe aucun chez les êtres vivants. Ceux-ci ne contiennent ni mousse de platine, ni bioxyde de manganèse, ni nickel réduit, pas plus qu'ils ne contenaient d'acide sulfurique ou d'acide nitrique. Nous retrouvons donc l'objection que nous avions pensé éviter : ce ne peut être avec ces catalyseurs que les plantes opèrent. Mais il ne faut pas trop s'en alarmer, et il y a, à ce sujet, deux observations à faire.

La première, c'est que nous avons tout de même fait un pas en avant, car si ces catalyseurs n'existent pas dans le corps des êtres vivants, tout au moins ne sont-ils pas, comme les premiers, *incompatibles* avec la nature chimique de ces êtres. Des tissus végétaux pourraient contenir du bioxyde de manganèse, tandis qu'ils seraient immédiatement détruits par l'acide nitrique et la soude; et de plus, si l'on analyse de plus près les phénomènes, on voit qu'il n'est même pas nécessaire qu'ils en contiennent pour que des catalyses aient lieu. En effet, si bizarre que le fait puisse paraître, il semble que la nature chimique d'un catalyseur soit, somme toute, un élément de peu d'importance pour le choix des réactions qu'il détermine. C'est ce que montre,

par exemple, la grande diversité des substances qui catalysent l'eau oxygénée. Mais il y en a bien d'autres exemples, et l'on a vu (Freundlich) des oxydations catalytiques causées par la présence du charbon, qui est normalement un corps réducteur, aussi bien que par celle du peroxyde de fer qui est un corps oxydant, ou de la mousse de platine qui est tout à fait neutre. On voit aussi que le nickel réduit catalyse les réactions les plus diverses : hydrogénations, dédoublements, polymérisations : ou que la silice, qui décompose l'alcool, peut être remplacée par l'alumine (Senderens), c'est-à-dire un corps acide par un corps basique, sans que le résultat soit changé. L'état physique semble être aussi, ou plus important que les fonctions chimiques du catalyseur : l'un des caractères essentiels de cet état physique semble être une très grande division de la matière, et cette division est aussi bien réalisable dans les tissus vivants que partout ailleurs. Nous ne sommes donc nullement obligés de supposer que ces tissus contiennent du nickel réduit, de l'oxyde de manganèse ou de la silice, mais seulement des substances ayant les mêmes propriétés physiques ou physico-chimiques ; on ne peut donc tirer parti contre notre hypothèse du fait qu'aucun de ces catalyseurs artificiels n'existe chez les êtres vivants. Au contraire, lorsqu'il s'agissait de réactifs chimiques ordinaires, et d'oxydations ou de réductions causées par l'acide nitrique ou le sodium, il fallait admettre que les tissus contiennent des substances aussi énergiquement oxydantes ou réductrices que ces deux

corps, c'est-à-dire incompatibles avec leur existence.

Une seconde remarque, que l'état peu avancé de nos connaissances sur les catalyses oblige à donner sous une forme assez vague, est relative à ce qu'on pourrait appeler la *puissance* d'un catalyseur. Il semble être d'autant plus facile de trouver un catalyseur pour une réaction déterminée, que cette réaction est plus près de se produire spontanément ; c'est ainsi que l'eau oxygénée, qui ne demande qu'à se décomposer, est catalysée par un nombre considérable d'éléments, de sels ou de composés de fonctions très variées. D'autres décompositions catalytiques au contraire portent sur des substances très stables ; c'est ainsi que l'alcool ne marque aucune tendance appréciable à se scinder en éthylène et en eau, lorsqu'il est seul, pas plus que l'oxyde de carbone à se décomposer en acide carbonique et en carbone. Il semble donc qu'on doive considérer la silice et le nickel, qui produisent par leur seule présence ces deux transformations, comme deux catalyseurs particulièrement *puissants*.

Cette puissance cependant ne se manifeste que dans certains cas et non dans tous, car ni la silice ni le nickel ne sont des catalyseurs universels, et ceci nous oblige à admettre qu'elle s'accompagne d'une certaine spécificité. Malheureusement, nous ne savons pas en quoi consiste cette spécificité et, en particulier, nous venons de voir qu'elle n'est pas liée aux affinités chimiques

que peut manifester le catalyseur en d'autres circonstances ; mais il semble difficile de ne pas admettre qu'elle est d'autant plus complète que le catalyseur est de constitution plus complexe, de même qu'une machine construite pour faire un travail déterminé et rien que celui-là (comme un distributeur automatique par exemple), est composée de plus d'organes qu'une machine dénuée de toute spécificité comme un levier ou un marteau. Les catalyseurs dont nous supposons l'existence dans les cellules ayant toujours le même travail à faire, puisque les conditions dans lesquelles vit cette cellule sont peu variables, il est très naturel de supposer qu'ils seront absolument spécifiques, que leur puissance sera limitée à un seul cas, et qu'ils devront être de constitution beaucoup plus complexe que celle de nos catalyseurs minéraux, bons à tout faire. Si le nickel, ou le fer réduit, ou l'oxyde de manganèse n'existent pas dans les tissus vivants, leurs sels tout au moins s'y trouvent; et si leur puissance catalysante *en général* semble diminuée dans ces sels, il est très possible qu'elle soit conservée ou même exaltée pour la réaction particulière et unique à laquelle ils auront à participer. L'existence de catalyseurs organiques est ainsi rendue très vraisemblable. Il est fâcheux certainement que nous en soyons réduits à discuter de possibilités, mais j'ai pris soin d'indiquer que nos connaissances sur la chimie de la matière vivante étant fort peu avancées, il faudrait bien souvent remplacer les affirmations par des suppositions, et les identités par des analogies.

Il est un autre caractère des actions vitales dont nous pouvons chercher l'explication dans ces phénomènes de catalyse. J'ai dit que la synthèse de certains principes naturels (l'acide citrique par exemple), pouvait se faire avec un excellent rendement, tandis que celui des opérations synthétiques de la chimie organique était le plus souvent assez mauvais. Il est assez intéressant de constater que le rendement des opérations catalytiques est souvent très supérieur et parfois excellent. MM. Sabatier et Senderens ont souvent insisté sur ce fait que les transformations par le nickel réduit étaient totales ou presque totales, c'est-à-dire qu'à côté du produit principal les produits accessoires ne se formaient qu'en très petite quantité. G. Bertrand a indiqué de même que la préparation de la purpurogalline par l'oxydation catalytique du pyrogallol donnait de bien meilleurs résultats que l'oxydation par voie purement chimique. De même, la décomposition de l'acide oxalique en présence de la glycérine donne une quantité d'acide formique presque égale à la quantité théorique, tandis que la décomposition par la chaleur seule n'en donne que fort peu. Il semble y avoir là une propriété générale dont l'application au sujet qui nous occupe est immédiate.

Tout ce qui vient d'être dit nous confirme dans cette hypothèse que le rôle des catalyses, dans la chimie des êtres vivants, doit être considérable. Cette hypothèse peut être immédiatement soumise au contrôle de l'expérience : en effet, si elle

est exacte, nous devons pouvoir isoler des cellules vivantes les catalyseurs qu'elle contient. Or, ici, une partie de la besogne (partie peu importante il est vrai) est déjà faite. En effet, il est évident, d'après ce qui a été dit dans l'un des chapitres précédents, que les diastases ne sont autre chose que des catalyseurs, puisqu'elles agissent, comme eux, par simple contact et sans se détruire. La sucrase, extraite de la levure, transforme en sucre interverti mille fois son poids d'amidon; le catalyseur acide chlorhydrique peut, lui aussi, hydrolyser et transformer en sucre interverti mille fois son poids de sucre par simple contact. Les oxydases de l'arbre à laque oxydent l'hydroquinone au contact de l'air : la mousse de platine peut de même oxyder l'alcool. La catalase du tabac décompose l'eau oxygénée, le bioxyde de manganèse agit de la même manière. Il n'y a de différence que dans l'origine des substances, car leur effet est le même. Les diastases sont des catalyseurs naturels, extraits des organismes au lieu d'être produits par synthèse; les catalyseurs sont des diastases artificielles.

Ainsi, si l'on veut se reporter à l'étude des diastases, on verra que, conformément à nos hypothèses, un certain nombre des fonctions essentielles des végétaux ou des animaux sont ramenées à des catalyses. S'il restait le moindre doute à ce sujet, ce doute serait immédiatement levé par le fait que beaucoup de ces diastases naturelles peuvent être remplacées par des catalyseurs inorganiques sans que l'effet soit

changé[1]. Ainsi, nous venons de voir que la *sucrase*, diastase extraite de la levure, peut être remplacée par un catalyseur, l'acide chlorhydrique: elle peut encore, d'après Rayman et Sulc, être remplacée par la mousse de platine, de palladium ou de rhodium.

De même l'*amylase* (de l'orge germé, qui dépolymérise l'amidon en dextrine, la *dextrinase* (même origine, qui dédouble la dextrine en maltose; la *maltase* (du maïs, qui dédouble le maltose en glucose, peuvent être remplacées, d'après Neilson, par le noir de platine, qui produit le même effet que la somme amylase + dextrinase, ou par les acides, qui sont équivalents à la somme amylase + dextrinase + maltase.

La *pepsine*, du suc gastrique, qui dissout les matières albuminoïdes, la *présure* de la muqueuse de l'estomac, qui coagule le lait, dans certaines conditions l'*uréase* de certains microbes qui transforment l'urée en carbonate d'ammoniaque, peuvent aussi être remplacées par les acides.

La *laccase* (de la laque chinoise), qui oxyde certains corps aromatiques, notamment l'hydroquinone, peut être remplacée par certains sels de manganèse (G. Bertrand) ou de fer (Wolff). D'autres sels de fer peuvent aussi, d'après Wolff, réduire l'eau oxygénée en présence de corps oxydables, agissant comme les *peroxydiastases*

1. Il est bien entendu que je ne m'attache qu'aux grandes lignes: sur plus d'un point, des restrictions de détail seraient nécessaires. Je ne pourrais les indiquer qu'en étendant beaucoup ce chapitre. Une étude générale des diastases a été donnée par P. Thomas, *Bulletin de l'Institut Pasteur*, 1906.

de certaines racines. Enfin, j'ai déjà indiqué plusieurs corps qui décomposent l'eau oxygénée comme la *catalase* que contiennent beaucoup de feuilles, en particulier celles du tabac.

Cette identité maintes fois constatée entre les diastases naturelles et les catalyseurs peut bien être considérée comme un encouragement à persévérer dans cette voie et à rechercher systématiquement dans les actes vitaux des phénomènes de catalyse. Mais rappelons-nous que nous y avons été conduits en recherchant comment les végétaux pouvaient opérer leurs synthèses et nous verrons de suite comme nous sommes peu avancés. Toutes les diastases isolées jusqu'à ce jour (ou peu s'en faut), sont des diastases de décomposition et non de composition, c'est-à-dire juste l'inverse de ce que nous cherchons, et l'on ne peut guère citer comme faisant exception que la maltase et la lipase, qui font dans certaines conditions (pas toujours très voisines des conditions naturelles), l'une la synthèse du maltose aux dépens du glucose, l'autre celle des graisses aux dépens des acides gras et de la glycérine, ce qui est un assez pauvre résultat puisque c'est justement la synthèse de l'acide gras qui nous intéresse. En fait, on n'a pas encore isolé de diastases naturelles de condensation et nous ne savons produire ces phénomènes de véritable synthèse que par l'emploi de catalyseurs inorganiques, le cas le plus intéressant étant celui des bases minérales qui, ainsi que nous l'avons vu en faisant la théorie de l'assimilation chlorophyllienne, condensent l'al-

déhyde formique en donnant directement des sucres. Il ne semble pas douteux qu'il existe dans les feuilles des catalyseurs organiques conduisant au même résultat : mais ils n'ont pas été isolés et ce chapitre doit se terminer, lui aussi, par l'aveu de notre ignorance.

CHAPITRE IX

LA SYNTHÈSE VÉGÉTALE : LES ÉQUILIBRES CHIMIQUES

On dit qu'une réaction est *totale* quand il ne reste plus trace des composés qui y ont pris part. La réaction de l'acide chlorhydrique sur le zinc est totale, parce que, si la quantité d'acide est suffisante, il ne reste plus à la fin de l'expérience aucune trace de zinc à l'état de métal. La combustion du gaz d'éclairage, du charbon ou de l'alcool est totale car, s'il y a un excès d'oxygène, il ne reste pas trace de gaz, ni de charbon, ni d'alcool. Je devrais dire qu'il n'en reste aucune trace perceptible : on doit en effet à une série de travaux admirables de Henri Sainte-Claire Deville et de ses élèves la démonstration de ce fait que, en prenant les mots dans leur sens le plus rigoureux, *il n'y a jamais de réaction totale.*

Prenons un exemple : la combinaison de l'oxygène et de l'hydrogène. Cette réaction est extrêmement active et la flamme qui en résulte a une température supérieure au point de fusion de presque tous les corps connus, montrant ainsi quelle puissante affinité lie l'oxygène à l'hydro-

gène dans l'eau qui est le produit de leur union. Si l'on a opéré en présence d'un excès d'oxygène, on ne trouve pas trace d'hydrogène dans les produits de la combustion; tout a été brûlé et il semble bien que, conformément à la définition donnée plus haut, la réaction soit totale. Mais, au lieu d'examiner ces produits après qu'ils ont été ramenés à la température ordinaire, examinons-les à une température beaucoup plus élevée, 1500° par exemple : alors nous y trouverons de l'hydrogène, et cet hydrogène, à cette haute température, peut rester *indéfiniment* mélangé à un excès d'oxygène sans s'y combiner. A une haute température la réaction n'est donc pas totale. Il y a plus encore : si nous chauffons à cette même température de 1.500° ou de 2.000° de la vapeur d'eau, elle se décomposera en partie et nous obtiendrons un mélange d'oxygène et d'hydrogène noyés dans une grande quantité de vapeur d'eau.

A cette décomposition, sous la seule influence de la chaleur, on a donné le nom de *dissociation*. La vapeur d'eau se *dissocie* à température élevée jusqu'à une certaine limite, jusqu'à ce que, par exemple, elle contienne 1 p. 100 du mélange d'oxygène et d'hydrogène ; à ce point la décomposition s'arrête. Si nous portons à cette même température un mélange d'oxygène et d'hydrogène, dans les proportions exactes où ils existent dans l'eau, ils se combineront, mais pas totalement, seulement dans la proportion de 99 p. 100, c'est-à dire que dans les deux expériences l'état final, l'*état limite*, sera le même. Nous dirons que, à la température

considérée, nous avons observé un *équilibre chimique*, parce qu'il y a équilibre entre la vapeur d'eau, d'un côté, et le mélange oxygène-hydrogène de l'autre, et nous donnerons ce nom à tous les phénomènes du même genre.

Si, à la température ordinaire, la réaction paraît totale, c'est parce que la proportion d'eau dissociée, dans l'état d'équilibre, à une certaine température, diminue très rapidement quand cette température s'abaisse. Cette proportion est, en effet, d'après Nernst et Wartenberg :

à 1 000° (absolus)	ou	730 centigrades,	de	0,00003 p. 100.
à 1 500°	—	1 230	—	0,02 —
à 2 000°	—	1 730	—	0,59 —
à 2 500°	—	2 230	—	3,98 —

La marche des nombres montre qu'elle doit être, à la température ordinaire, absolument insensible ; et, en effet, d'après la formule qui représente les résultats de Nernst et Wartenberg, elle doit alors être de

0,000 000 000 000 000 000 000 000 05 p. 100

Aucun réactif ne permettrait de la déceler[1] ; la réaction est *pratiquement* complète.

Ce qui est vrai de la vapeur d'eau l'est de tous

1. Il semble que cette proportion extraordinairement petite puisse être négligée. Cependant, il faut remarquer qu'elle figure dans une formule théorique donnant la force électromotrice de la pile à oxygène et hydrogène, et qu'elle donne une valeur de cette force *qui concorde avec les autres*. L'hypothèse d'une dissociation nulle conduit, au contraire, à une valeur absurde. On n'a donc pas le droit de négliger la dissociation de la vapeur d'eau, même à la température ordinaire.

les autres composés, si stables qu'ils paraissent. L'acide carbonique par exemple se dissocie en oxyde de carbone et oxygène

$$CO^2 = CO + O$$

D'après les mêmes auteurs, la dissociation est

à 1 500° (absolus) . . . . . 0,04 p. 100.
à 2 500° — . . . . . 16 —

et à la température ordinaire, beaucoup plus faible encore que celle de l'eau.

L'acide chlorhydrique se dissocie de même en chlore et hydrogène : l'oxyde de carbone, en acide carbonique et en charbon, et, dans tous ces cas, on observe un équilibre. La réaction de l'acide carbonique sur la chaux paraît totale à la température ordinaire ; de l'air, chargé d'acide carbonique, passant sur la chaux, s'en dépouille jusqu'à la dernière trace perceptible. Dans un four à chaux, au-dessus de 1000°, c'est le contraire qui se produit, et un courant d'air, passant sur la pierre à chaux (qui n'est que du carbonate), entraîne l'acide carbonique, par suite de la dissociation de la pierre calcaire. Il ne semble pas qu'aucun composé échappe à cette dissociation ; à toute température, on a un équilibre entre ce composé et ses produits de décomposition. Comme, très souvent, cet équilibre correspond à une décomposition d'autant plus complète que la température est plus élevée, on voit qu'il existe, pour la plupart des composés de la chimie, une température au-des-

sus de laquelle ils ne peuvent exister. Dans la flamme de l'arc électrique, par exemple (3500° environ), beaucoup de composés sont déjà dissociés, et l'eau, en particulier, doit être entièrement détruite ; à la surface du soleil (5.500° à 6.000°), aucun probablement ne subsiste.

Les exemples que je viens de citer correspondent aux cas les plus simples des équilibres chimiques, et méritent à ce titre d'être mentionnés en premier lieu. Il en existe d'autres, un peu plus complexes, quoique soumis aux mêmes lois, qui n'ont plus besoin pour se manifester de températures élevées, et dont l'étude nous sera très utile pour la compréhension de quelques phénomènes vitaux. Par exemple, l'acide acétique réagit, à la température ordinaire, sur l'alcool, pour donner de l'éther acétique (acétate d'éthyle) et de l'eau

$$C^2H^4O^2 + C^2H^5.OH = C^2H^3O^2.C^2H^5 + H^2O.$$

Cette réaction est exactement semblable à celle qui se produirait entre l'acide acétique et la potasse

$$C^2H^4O^2 + K.OH = C^2H^3O^2.K + H^2O$$

pour donner de l'acétate de potasse ; seulement, tandis que cette dernière est pratiquement complète, la première s'arrête, d'après Berthelot et Péan de Saint-Gilles, quand 67 p. 100 environ de l'acide ont disparu. Réciproquement, l'éther acétique, mélangé à l'eau, se décompose en acide acétique et alcool, par une réaction exactement

inverse de la première, et cette *réaction inverse* s'arrête quand 33 p. 100 de l'éther sont décomposés, c'est-à-dire quand 67 p. 100 de l'acide sont encore à l'état d'éther. L'état final d'*équilibre chimique* est donc le même que dans le premier cas ; on arrive au même résultat final, que l'on parte de l'éther ou que l'on parte du mélange d'acide et d'alcool. Avec un autre acide, un autre alcool, nous obtiendrions les mêmes résultats.

Tout ceci s'explique, de la manière la plus simple, par la considération des *vitesses de réaction*. Quand un composé se forme dans une réaction, la *vitesse* de cette réaction est la quantité de ce composé qui se forme dans l'unité de temps. Cette vitesse est extrêmement grande dans certains cas, quand par exemple on enflamme une substance explosive (la transformation est alors achevée en quelques millionièmes de seconde), et extrêmement petite dans d'autres, comme par exemple dans l'hydrolyse du sucre par l'eau pure, hydrolyse qui ne serait, comme nous l'avons vu au chapitre précédent, qu'à moitié achevée après 1.500 ans ; entre ces deux extrêmes, elle peut prendre toutes les valeurs possibles. Dans le mélange d'alcool et d'acide, ces deux corps se combinent avec une certaine vitesse, c'est-à-dire que dans une minute une certaine quantité de ces deux corps disparaît pour former de l'éther et de l'eau. De même, dans un mélange d'eau et d'éther, ce dernier tend à se détruire spontanément, avec une certaine vitesse différente de la première, c'est-à-dire que dans une minute il se

reforme, à ses dépens, une certaine quantité d'acide et d'alcool. Il s'en reforme naturellement d'autant plus qu'il y a plus d'éther, comme aussi il se forme d'autant plus d'éther qu'il y a plus d'acide et d'alcool.

Il y aura évidemment équilibre, c'est-à-dire que l'état du système ne changera plus si la quantité d'éther formé est, à chaque instant, égale à la quantité d'éther détruit. Dans un mélange ne contenant que de l'alcool et de l'acide, l'éther se détruit avec une vitesse nulle, puisque sa concentration est nulle, et se forme avec une vitesse finie ; donc, sa quantité augmente. Au contraire, dans un mélange ne contenant que de l'éther et de l'eau, il ne peut s'en former puisqu'il n'y a ni alcool ni acide, mais il s'en détruit ; donc, sa quantité diminue. Entre les deux extrêmes, il y a nécessairement un point, c'est-à-dire une composition telle que la quantité d'éther reste constante ; c'est le point d'équilibre chimique. Celui-ci résulte donc simplement, en dernière analyse, de ce qu'aucune des deux réactions n'est instantanée.

Supposons que nous puissions enlever à chaque instant l'éther produit, tout en laissant l'alcool et l'acide, alors la réaction *directe* (éthérification) n'étant plus gênée par la réaction *inverse* (destruction de l'éther), puisque celui-ci est enlevé à mesure qu'il se produit, sera totale (pratiquement totale). Ainsi, si l'on chauffe vers 60° un mélange d'acide formique et d'alcool méthylique, l'éthérification sera totale, parce que le formiate de méthyle, très volatil (il bout

vers 35°), s'échappera à mesure qu'il se produira. Si c'est l'eau qu'on enlève à mesure (par l'action d'un déshydratant), le résultat sera le même, l'eau étant un facteur de l'équilibre au même titre exactement que l'éther. Si, au lieu d'être volatil, un des produits de la réaction est insoluble, le résultat sera encore le même ; par exemple, si l'on ajoute de la baryte à un mélange d'acides sulfurique et chlorhydrique, elle se combinera exclusivement à l'acide sulfurique, avec lequel elle forme un sel *insoluble* (sulfate de baryte), tandis que de la potasse, de la soude, de l'ammoniaque se partageraient entre les deux acides, avec lesquels elles forment deux sels solubles, suivant des lois d'équilibre. L'insolubilité du sulfate de baryte fait qu'il se dépose à l'état solide aussitôt qu'il est formé, et qu'il est ainsi mis en dehors de l'équilibre, comme s'il n'était pas présent.

Des réactions telles que celle de l'acide acétique sur l'alcool, ou plus généralement d'un acide sur un alcool, sont dites des réactions limitées par la réaction inverse, ou plus simplement des *réactions limitées*. Elles ont toutes le caractère de devenir totales (pratiquement totales), si on élimine l'un des produits de la réaction à mesure qu'il se produit. Il faudra nous rappeler que cette élimination peut se produire par deux procédés principaux : par volatilité (quand les conditions sont telles que cette volatilité puisse se manifester), ou par insolubilité [1].

1. On remarquera l'analogie avec les lois de Berthollet.

Avant de donner l'application de ces phénomènes d'équilibre au problème présent, celui de la synthèse des principes naturels dans les organismes, il faut mentionner une propriété sur laquelle nous devons aussi nous appuyer. Beaucoup de réactions de chimie organique (on pourrait même dire la presque totalité) ne sont pas simples. J'entends par là que le produit de la réaction n'est pas unique, mais qu'il s'en forme en même temps un certain nombre, et quelquefois un très grand nombre[1]. Faisons par exemple réagir l'acide nitrique sur l'alcool, et nous for-

1. C'est pour cette raison que les rendements des opérations, en chimie organique, sont souvent très mauvais. A côté du produit principal il s'en forme une dizaine d'autres, en proportions variables avec les circonctances.

Les réactions de chimie minérale présentent ce caractère à un beaucoup moindre degré. Les méthodes si nombreuses d'analyse quantitative reposent essentiellement sur la transformation totale d'un composé en un autre avec un rendement de 100 p. 100. Les méthodes correspondantes en chimie organique sont rares, et généralement beaucoup moins exactes (dosage de l'alcool à l'état d'iodoforme, par exemple) et c'est pour cela que l'analyse organique n'est souvent possible qu'en opérant la combustion complète du corps étudié. Quand celui-ci contient des radicaux complexes, ce qui est le cas le plus fréquent, ce procédé de combustion est barbare, car il détruit ces radicaux qu'il vaudrait mieux doser séparément; on aurait alors, non pas seulement la composition brute, mais celle-ci et la constitution. Soit, par exemple, l'acétal $C^2H^4(OC^2H^5)^2$, formé de l'union de 1 molécule d'aldéhyde C^2H^4O et de 2 molécules d'alcool C^2H^5OH avec perte de 1 molécule d'eau. Pour établir sa formule, on le brûle complètement et on dose C, H et O. Il serait bien préférable de pouvoir y doser séparément l'alcool et l'aldéhyde et de montrer qu'ils y sont bien dans le rapport de 1 à 2, de même que pour analyser le sulfate d'ammoniaque, formé de SO^4H^2 et de NH^4OH, on dose séparément les groupements SO^4 et NH^4 et non les éléments S, O, N, H. Mais on ne peut le faire, car les méthodes de transformation totale manquent.

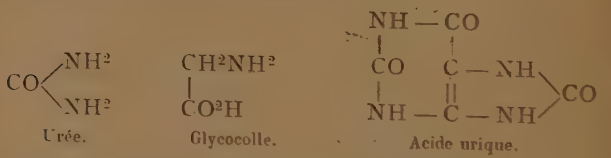
merons simultanément les produits suivants :

Nitrate d'éthyle	$C^2H^5.NO^3$
Nitrite d'éthyle	$C^2H^5.NO^2$
Aldéhyde	C^2H^4O
Acide acétique	$C^2H^4O^2$
— glycolique	$C^2H^4O^3$
Glyoxal	$C^2H^2O^2$
Acide glyoxylique	$C^2H^2O^3$
— oxalique	$C^2H^2O^4$.
— formique	CH^2O^2
— carbonique	CO^2.

A part les deux premiers, qui sont des éthers, tous les autres sont des produits d'oxydation. Or, si nous faisons le tableau des produits d'oxydation possibles de l'alcool, c'est-à-dire des corps plus oxydés que lui, contenant 1 ou 2 atomes de carbone seulement, nous trouvons qu'ils sont tous représentés dans cette liste, ou presque tous ; encore quelques-uns de ceux qui manquent ont-ils dû se produire, comme la formaldéhyde, qui a dû précéder l'acide formique. et n'ont-ils pu échapper que par ce qu'ils se sont oxydés aussitôt formés. Nous pouvons donc dire que *tous les produits possibles se sont formés*.

Sans aller peut-être aussi loin, beaucoup de réactions organiques sont dans le même cas ; elles ne sont pas simples, et à côté du produit qui devrait logiquement se former, on en trouve beaucoup d'autres, et souvent en aussi grande quantité. Ces derniers ne sont même pas nécessairement en rapport simple avec les matières premières, mais ils peuvent avoir une constitution très différente, et, en particulier, beaucoup

plus complexe. Ainsi, en chauffant au rouge des vapeurs d'alcool ou d'acide acétique, on obtient, en même temps que des produits *logiques* (éthylène, eau), des produits *illogiques*, tels que la naphtaline ou le phénol. Il est vrai que, dans ce cas, ces produits accessoires ne forment qu'une faible partie du total ; mais, dans d'autres, ils forment, au contraire, une partie notable ; ainsi, l'acétone C^3H^6O, distillée avec l'acide sulfurique concentré qui agit comme déshydratant, devrait donner logiquement l'allylène C^3H^4, tandis qu'elle donne en abondance du mésitylène $C^6H^3(CH^3)^3$ ou triméthylbenzène, dont la molécule a une constitution entièrement différente, et 3 fois plus complexe. En fondant de l'urée avec du glycocolle, Horbaczewski a obtenu de l'acide urique ; or, si l'on rapproche les formules de constitution de ces 3 corps



Urée. Glycocolle. Acide urique.

on voit que, quoiqu'il y ait entre eux une parenté évidente, le dernier ne résulte pas logiquement de l'union des deux premiers, union qui semblerait devoir donner un résultat beaucoup plus simple.

Un nombre considérable de telles réactions ont été reconnues et pourraient être citées, mais il est probable qu'un beaucoup plus grand nombre encore ont passé inaperçues. Les chimistes

suivent, en effet, la filiation régulière des corps, et non les variations irrégulières, qui, par analogie avec le même phénomène botanique, pourrait être appelés les *mutations* des molécules. La tendance actuelle de beaucoup de chimistes est de considérer comme peu intéressantes les transformations qui ne sont pas logiques, et, par suite, de ne pas les rechercher; la synthèse d'un composé n'est jugée valable que si elle a été accomplie à petits pas, degré par degré, et c'est peut-être à cette sorte de *transformisme* que la chimie organique doit d'avoir jeté aussi peu de lumière sur les phénomènes naturels.

Il semble en effet, non seulement que ses méthodes soient tout à fait différentes, comme nous l'avons vu, des méthodes vitales, mais que les produits intermédiaires, ou, si l'on veut, les échelons, par lesquels elle monte de l'acide carbonique et de l'eau jusqu'aux produits complexes de synthèse, soient eux-mêmes différents. Elle prépare la glycérine en partant de l'acétone, l'indigo en partant du toluène et de la naphtaline ; il n'y a, dans les feuilles, ni acétone, ni toluène, ni naphtaline. Le plus souvent, les produits intermédiaires manquent dans la plante, ou bien n'y sont pas saisissables, de telle sorte qu'on demande si vraiment la nature suit la méthode patiente et sûre de la chimie organique transformiste, si elle bâtit la molécule pierre à pierre, ou si elle ne profite pas, au contraire, de ces réactions illogiques pour aller plus vite en besogne et parvenir, en deux ou trois sauts, aussi loin qu'en dix pas comptés.

Dans cette hypothèse, la synthèse de composés assez complexes se ferait en quelque sorte toute seule, avec le nombre minimum de réactions, c'est-à-dire avec les deux caractères reconnus de simplicité et d'économie. Dans les exemples que j'ai cités, c'est généralement sous l'influence d'une température assez élevée que se forment les molécules complexes ; mais nous avons vu, au chapitre précédent, que les mêmes effets peuvent être produits à plus basse température sous l'action d'un catalyseur. Il n'est nullement invraisemblable qu'il existe un catalyseur transformant par exemple, à la température ordinaire, l'acétone en mésitylène ; il peut fort bien exister aussi des catalyseurs qui transforment les molécules simples des composés à une seule ou à deux molécules de carbone ou d'azote en molécules complexes de camphre, de térébenthine ou d'alcaloïdes. A coup sûr, ceci n'est qu'une hypothèse ; mais elle est déjà vérifiée dans un cas, puisque nous savons que la polymérisation de l'aldéhyde formique, sous l'action d'un alcali, produit *directement* des sucres $C^6H^{12}O^6$ à 24 atomes, tandis que la molécule de la formaldéhyde n'en contient que 4. Il paraît probable que dans ce cas au moins la synthèse n'est pas régulière et qu'elle ne consiste pas dans la soudure méthodique des molécules de formaldéhyde par deux, puis par trois, etc., jusqu'à la constitution d'un sucre en C^6. Il y a plutôt passage brusque de la formaldéhyde à ce sucre, formé en vertu de lois de dynamique chimique que nous ignorons.

Cette hypothèse n'explique nullement que les mêmes produits se forment dans toutes les plantes, quoique les éléments dont ils proviennent soient partout les mêmes. Il n'est en effet pas sûr que deux catalyseurs différents et il y a tout lieu de supposer qu'ils sont différents pour chaque plante) ne puissent pas diriger une réaction dans deux sens différents, c'est-à-dire transformer un même mélange de deux manières différentes. Ensuite, il faut bien remarquer que si les plantes se trouvent, en effet, dans des conditions remarquablement uniformes, quant aux conditions extérieures et à la nature de leurs aliments, elles sont tout à fait distinctes par leur origine, puisque chacune provient d'une graine de la même espèce, qui est absolument spécifique. Les réactions mutuelles de la lumière solaire et des aliments s'effectueront donc en présence de substances différentes pour chaque espèce de plante, et c'est ici qu'interviennent les phénomènes d'équilibre dont nous parlions plus haut, et que nous avons momentanément abandonnés pour nous occuper des mutations moléculaires.

Indiquons d'abord, comme remarque générale, que l'on rencontre à chaque pas de ces équilibres dans l'étude des êtres vivants. Ils se produisent très fréquemment, comme nous l'avons vu, lorsque les réactions ne sont pas instantanées, et surtout les réactions vitales se font toutes avec lenteur. La constance du poids, dans les organismes adultes, n'est que le résultat de

l'équilibre entre l'assimilation et la désassimilation ; or, ceci signifie que, presque dans chaque cellule, les matériaux combustibles, en particulier les hydrates de carbone et les graisses, sont sous la dépendance de réactions limitées et réversibles, comme celle qui donne naissance à l'éther acétique.

La variation de l'amidon dans les feuilles, du glycogène dans le foie, résulte encore de réactions limitées, car elle est positive lorsque la concentration en sucres dans la sève ou dans le sang dépasse une certaine limite, et négative (c'est-à-dire que ces deux principes se détruisent), lorsqu'elle est au contraire en dessous de cette limite. D'une façon générale, l'action de chaque mécanisme est contrariée et limitée par celle d'un mécanisme inverse, et il est nécessaire qu'il en soit ainsi, car cette action ne peut pas, quelle qu'elle soit, s'exercer indéfiniment tout en laissant l'être semblable à lui-même. Quoique ces deux mécanismes opposés soient souvent différents (si c'était le même, agissant en sens inverse, le fonctionnement des êtres vivants serait entièrement réversible), il existe un nombre suffisant de cas où ils se réduisent à un seul pour que nous considérions comme limitées beaucoup de réactions essentielles à la vie. Nous pouvons appliquer alors ce que nous avons appris plus haut sur les caractères que présente ce genre de réactions.

Reprenons, pour sa simplicité seulement, l'exemple, donné plus haut, de l'oxydation de l'alcool par l'acide nitrique. Les réactions que

nous avons observées ne sont pas *limitées*, au sens où nous avons pris le mot, c'est-à-dire qu'elles ne peuvent être réalisées en sens inverse comme une éthérification. L'acide nitrique, réagissant sur l'alcool, par exemple suivant la formule

$$CH^3.CH^2OH + NO^3H = CH^3.COH + NO^2H + H^2O$$

c'est-à-dire en donnant de l'aldéhyde et de l'acide nitreux, il n'arrivera pas qu'un mélange d'aldéhyde et d'acide nitreux redonne de l'alcool et de l'acide nitrique. Mais supposons que toutes les réactions qui donnent la liste des composés énumérés plus haut soient limitées, et, par suite, réversibles ; il sera possible de remonter de l'acide carbonique et de l'acide oxalique à l'alcool en passant par tous les corps intermédiaires. Supposons, en outre, que l'un de ces corps intermédiaires (et un seul) soit, ou volatil, ou insoluble ; il résulte des principes posés plus haut qu'à la fin de l'opération tout l'alcool sera transformé dans ce produit volatil ou insoluble, qui se formera sans cesse et ne se détruira jamais, sa volatilité ou son insolubilité le soustrayant à l'équilibre à mesure de sa formation.

Il résulte de là qu'il peut se former de *grandes quantités* d'un corps, aussitôt que la production de ce corps dans les conditions de l'expérience est possible, *même à l'état de traces*, et que ce corps est ou volatil ou insoluble. S'il en fallait un exemple, on pourrait citer la formation du bleu de Prusse dans les mélanges épurateurs du gaz d'éclairage ; ces mélanges contiennent de l'oxyde

ferrique et de la chaux, tandis que les gaz, sortant des cornues, renferment du cyanure d'ammonium ; entre tous ces produits, il se fait du bleu de Prusse par une réaction assez compliquée, puisqu'il faut d'abord que le cyanogène du cyanure forme le radical ferrocyanogène (ce qui exige la présence d'oxyde ferreux en milieu alcalin) qui se combinera ensuite à l'oxyde ferrique en milieu acide. Cependant, le bleu de Prusse se forme, à cause de sa complète insolubilité, comme il se forme par des réactions illogiques toutes les fois ou presque toutes les fois qu'un cyanure se trouve en présence d'un sel de fer.

Nous pouvons négliger le cas où il se forme des composés volatils. Ce cas n'est pas intéressant pour la pratique (sauf si le produit volatil est l'oxygène éliminé pendant l'assimilation), puisqu'un composé volatil serait perdu. Nous pouvons nous borner à dire qu'un corps insoluble a beaucoup plus de chances de se former qu'un corps soluble. Cette règle peut être considérablement élargie ; en effet, l'insolubilité d'un corps n'a d'autre effet que de le mettre à l'écart, et il peut y être mis d'une autre manière : si, par exemple, aussitôt formé, il entre en combinaison avec un autre, ou se polymérise en se condensant avec lui-même. Au point de vue de l'équilibre chimique, le résultat est exactement le même ; le corps n'entre plus en ligne de compte, et il se formera indéfiniment aux dépens des autres, tant qu'il restera de ces derniers. En faisant la théorie de l'assimilation chlorophyllienne, nous avons beaucoup parlé de l'aldéhyde formique ; c'est un

corps qui a une tendance extrême à se polymériser. Il en résulte que si, dans une réaction quelconque, l'un des produits de l'équilibre est de l'aldéhyde formique, quand bien même ce ne serait qu'en proportion excessivement faible, le fait que cette aldéhyde se polymérise aussitôt fera que, finalement, le système en équilibre se transformera *intégralement*, par son intermédiaire, dans ces produits de polymérisation. Ceux-ci sont des sucres identiques, pour une partie du moins, avec les sucres naturels ; on voit donc comment ces derniers se forment, aussitôt qu'il peut se produire un équilibre dont la formaldéhyde est un des facteurs.

Comme les réactions de condensation ou de polymérisation sont très fréquentes dans la chimie des composés du carbone ou de l'azote, qui forment la majeure partie des produits cellulaires, on voit que des phénomènes analogues pourront se produire dans un grand nombre de cas. Il arrivera très souvent qu'un produit formé en petite quantité, trouvant immédiatement à qui se combiner (ou se combinant à lui-même, comme beaucoup d'aldéhydes) finira par s'accumuler en grandes quantités sous la forme de dérivé plus ou moins facilement reconnaissable, et ceci sans qu'on puisse retrouver les produits intermédiaires de réaction, dont l'existence n'est que temporaire. Cette accumulation sera d'autant plus facile que, existant à l'état naissant, le produit initial entrera en réaction avec une facilité encore plus grande que dans d'autres conditions.

D'une façon générale, l'insolubilité d'un corps en

rendra la naissance plus facile. Parmi les corps insolubles, il en est un auquel on pense immédiatement : l'amidon, produit constant de l'assimilation chlorophyllienne. Quoique sa molécule soit fort complexe, il n'y aurait, d'après ce que nous venons de voir, rien d'impossible à ce qu'il fût dans certains cas le premier produit saisissable de l'assimilation : en effet, la synthèse végétale n'est nullement obligée à remonter toujours du plus simple au plus complexe, et au contraire le fait que les molécules de constitution compliquée sont généralement insolubles leur donne un avantage considérable à cet égard. J'ajouterai que les corps colloïdaux semblent se comporter, en ce qui concerne les équilibres, comme ceux qui sont insolubles, ce qui explique leur diffusion et leur abondance dans les cellules des êtres vivants des deux règnes.

L'application générale de ces phénomènes de mutation moléculaire et d'équilibre permet ainsi de se représenter d'une façon plus simple la synthèse végétale, en lui enlevant une partie de son caractère mystérieux. Il semble qu'on puisse les invoquer dès le début, pour expliquer la formation directe de l'aldéhyde formique à partir de l'acide carbonique et de l'eau. En effet, cette formation est possible, d'après Fenton, par une simple action réductrice (notamment par l'action du magnésium) : ou même, par la simple action des rayons solaires. En effet, ceux-ci peuvent produire, en certaines circonstances, les deux réactions limitées

$$CO^2 = CO + O$$
$$2H^2O = H^2 + H^2O^2$$

et il y a des raisons de croire que l'oxyde de carbone et l'hydrogène, mis en présence, peuvent former l'aldéhyde formique par union directe, limitée aussi

$$CO + H^2 = CH^2O.$$

Le rendement de ces opérations, telles qu'on a pu les réaliser jusqu'ici *in vitro*, est extrêmement petit ; mais nous venons de voir que ceci n'est pas une difficulté, l'aldéhyde se polymérisant immédiatement et toutes les réactions qui y mènent étant des réactions d'équilibre. L'assimilation du carbone, envisagée de cette manière, se rapprocherait des réactions les plus simples de la chimie minérale.

L'étude du fonctionnement chimique de la matière vivante pourra profiter de tous les travaux qui seront consacrés à ces phénomènes d'équilibre. Ceux-ci sont entièrement du domaine de la science nouvelle que l'on a appelée la *chimie physique*, science peu répandue en France, où elle déplaît à l'esprit conservateur de la plupart des savants qui ne sont plus jeunes. La chimie organique les néglige pour se cantonner dans son travail de synthèse, à la fois incomplet et superflu. La *chimie organisée* ou chimie de la vie se fondera vraisemblablement à la fois sur ce travail et sur les doctrines physicochimiques, le jour où une circonstance quelconque poussera les adeptes de la nouvelle science à s'en occuper.

CHAPITRE X

LES INFINIMENT PETITS CHIMIQUES

Dans un travail paru en mars 1870 sous la forme d'une thèse de doctorat, J. Raulin a étudié la végétation d'une plante microscopique très commune, l'*Aspergillus Niger*, moisissure noire qui, grâce à l'extrême diffusion de ses spores, s'ensemence et se développe spontanément sur les liquides organiques acides, tels que le jus du citron ou des fruits aigres, quand on les laisse quelque temps exposés à l'air et à la poussière. Il est assez facile de cultiver cette plante, qui n'est pas d'une alimentation difficile, sur des milieux nutritifs artificiels composés d'eau sucrée et de quelques matières minérales. Le développement que prend la plante dépend de la nature de ces matières minérales ; à la suite de très longues et patientes recherches, Raulin a indiqué comme particulièrement favorable à la culture le liquide suivant :

Eau	1 500
Sucre candi	70
Acide tartrique	4
Nitrate d'ammoniaque	4
Phosphate d'ammoniaque	0.6

Carbonate de potasse	0.6
Carbonate de magnésie	0.4
Sulfate d'ammoniaque.	0.25
Sulfate de zinc	0.07
Sulfate de fer.	0.07
Silicate de potasse	0.07

En mettant à part l'eau destinée à les dissoudre, les substances contenues dans ce liquide nutritif se divisent en deux groupes. Les trois premières renferment, en quantités assez considérables, le carbone et l'azote indispensables à la construction des tissus de la plante, et leur nécessité s'explique d'elle-même. Il n'est pas aussi facile de comprendre à quoi peuvent servir les autres ; en particulier, les doses de zinc, de fer et de silicium (de 1 à 2 pour 100.000) sont tellement faibles qu'on se demande quel rôle elles peuvent jouer. Cependant, Raulin a montré que la suppression de ces éléments dans le liquide nutritif réduisait la récolte d'Aspergillus, dans certaines circonstances

Au dixième pour	le	zinc
Au tiers	—	fer
Aux 3/5	—	silicium.

En nous en tenant au premier de ces éléments, nous voyons qu'une quantité de zinc excessivement petite, égale à $\frac{1}{5000}$ de la somme des autres aliments offerts à la plante, rend dix fois plus considérable la récolte d'*Aspergillus ;* il y a une véritable disproportion entre la cause et l'effet. Loin d'être diminuée dans les expériences qui ont suivi celles de Raulin, cette disproportion n'a

fait qu'augmenter. MM. G. Bertrand et Javillier ont montré que, probablement, tous les réactifs de Raulin contenaient du zinc, et que ce métal était par suite présent alors même qu'il croyait n'en avoir pas mis. En soumettant ces réactifs à une purification spéciale pour leur enlever jusqu'aux dernières traces de zinc, on rend encore beaucoup plus nette l'influence de ce métal. M. Javillier a obtenu les résultats suivants :

Avec 0,1 milligr. de zinc dans 250 c.c.	Récolte.	4,4 gr.
— 0,05 —	—	4,4 —
— 0,02 —	—	3,0 —
— 0,01 —	—	2,7 —
— 0 —	—	1.7 —

L'addition au liquide nutritif de $\frac{1}{25.000.000}$ de zinc augmente donc la récolte de plus de moitié ; pour 1 gramme de zinc mis comme engrais, on obtient 100 kilogrammes d'Aspergillus de plus. Ainsi les réactions biochimiques, auxquelles est due la croissance de la plante microscopique, sont sensibles à la présence de doses excessivement petites de certains éléments.

Ceci n'est pas vrai seulement pour l'Aspergillus. M. Javillier a étudié aussi l'action du zinc sur la végétation de la levure, et, quoiqu'elle soit moins sensible que l'Aspergillus, on observe cependant que l'addition de $\frac{1}{1.000.000}$ de ce même métal multiplie par 4 le poids de la levure récoltée.

Comme le zinc, le fer et la silice ont sur l'As-

pergillus une influence favorable. D'autres éléments agissent en sens contraire, et leur présence diminue considérablement le poids de la récolte que peut porter un même volume de liquide, ou même arrête complètement le développement. Ainsi, dans les expériences de Raulin, l'addition de

$$\frac{1}{1.600.000}$$ de nitrate d'argent

ou

ou $\frac{1}{500.000}$ de bichlorure de mercure (sublimé)

suffit à empêcher presque complètement la végétation de l'Aspergillus. Ces proportions sont encore excessivement petites.

Peu de plantes microscopiques ont été étudiées avec autant de soin que l'Aspergillus et la levure, et il n'est pas sûr que les nombres obtenus soient applicables à d'autres, car il y a des différences très considérables entre les diverses espèces. Mais nous retrouverions chez toutes le même caractère d'être sensibles à des traces très faibles de certains substances : à ce que j'ai appelé, dans le titre de ce chapitre, les *Infiniment petits chimiques*. Si maintenant, au lieu de plantes microscopiques, nous nous tournons vers des végétaux supérieurs ou vers des animaux, nous rencontrons une sensibilité du même ordre. Seulement, les phénomènes seront un peu plus compliqués, car si toutes les cellules d'une même levure sont à peu près identiques, et par suite influencées au même degré par les réactifs, les cellules du corps humain ou celles d'un arbre

sont différenciées en familles très variées, qui ne sont pas toutes sensibles aux mêmes substances ou du moins pas uniformément sensibles.

Chez les végétaux supérieurs ou les animaux, l'étude des substances favorisantes est difficile. En effet, la méthode de Raulin, qui consiste à comparer les résultats de deux cultures faites l'une avec, l'autre sans l'élément dont on veut déterminer l'importance, ne leur est pas aussi aisément applicable qu'aux microorganismes ; pour les plantes, à cause de la longue durée de leur végétation (plusieurs mois au lieu de quelques jours pour l'Aspergillus) et de la nécessité de les cultiver sur un milieu solide, beaucoup plus difficile à purifier qu'un milieu liquide[1] ; pour les animaux, parce qu'ils ne se nourrissent que de matières complexes, contenant un grand nombre d'éléments différents[2] qu'on ne peut en extraire sans les détruire. Au contraire, la recherche des substances nuisibles ne présente aucune difficulté spéciale, et elle conduit au même résultat, c'est-à-dire à la constatation d'une très grande sensibilité.

Les alcaloïdes, par exemple, sont des poisons très actifs. Un ou deux centigrammes de digita-

1. Depuis Boussingault, l'expérience a été faite bien souvent par les agronomes pour les éléments considérés comme principaux (phosphore, azote, potasse) ainsi que pour un certain nombre d'éléments accessoires (fer, manganèse).

2. *Au moins* les suivants : carbone, oxygène, hydrogène, azote, soufre, phosphore, arsenic, fer, calcium, magnésium, manganèse, zinc, potassium, bore, silicium ; probablement tous.

line ou d'aconitine, absorbés par un adulte, peuvent entraîner sa mort; en admettant que le poids moyen d'un homme soit de 65 kilos, c'est une dose de poison égale à $\frac{1}{5.000.000}$ seulement du poids du corps, et nous dirons que la toxicité de ces deux alcaloïdes est de 5 millions pour l'homme. Certains produits animaux sont encore plus actifs, comme par exemple les venins des serpents; la toxicité du venin de *Bungarus coeruleus*, serpent très commun dans l'Inde, est par exemple de 12 millions pour le lapin; celle de *Hoplocephalus*, serpent australien, est à peu près la même, notablement supérieure à celle du Cobra qui n'est que de 2 millions pour le lapin et 8 millions pour la souris[1]. Tous ces nombres d'ailleurs devraient être augmentés, car ils s'appliquent au venin desséché brut et non à la substance active qui n'y existe pas pure. Il en est de même du plus grand de tous, qui correspond à la toxine tétanique, tel que le microbe du tétanos la sécrète dans ses cultures; 6 milligrammes de cette toxine tuent sûrement un cheval de 500 kilos, ce qui correspond à une toxicité de 80.000.000. Tous ces nombres montrent que la sensibilité des animaux supérieurs est aussi grande que celle des organismes microscopiques.

La tendance actuelle est, comme nous l'avons vu, de ramener les actions vitales à des actions

1. A. Calmette. *Les Venins*, p. 182. Le venin de *Enhydrina*, serpent des côtes de l'Océan indien, a une toxicité de 25 millions par rapport au lapin, en injection intraveineuse. Les nombres du texte se rapportent à l'injection sous-cutanée, c'est-à-dire à la morsure.

de diastases; nous pouvons nous attendre, si cette manière de considérer les phénomènes est exacte, à retrouver chez les diastases la même sensibilité que chez la matière vivante. En effet, si la vie est une somme d'actions diastasiques, toute perturbation de la vie doit résulter d'une perturbation de l'une ou de l'autre de ces actions. On ne comprendrait pas qu'un être vivant fût aussi fragile si chacune de ses fonctions séparément était résistante; et, si celles-ci s'exercent par l'intermédiaire de diastases, nous devrons retrouver dans ces diastases quelque chose qui rappelle la délicatesse de leur origine.

Voici un tableau qui donne, d'après Fernbach, la quantité de sucre interverti par la *sucrase* en présence de quantités variables de soude, exprimées en millionièmes du poids du liquide :

Soude	0	Sucre interverti	35
—	3,3	—	32
—	6,6	—	25
—	10	—	18

Il suffit donc de $\frac{1}{100.000}$ de soude pour réduire de moitié l'activité de la sucrase. Il suffit de même, d'après E. Duclaux, de $\frac{1}{5.000}$ de cyanure de potassium pour la réduire au $\frac{1}{16}$, c'est-à-dire pour tuer presque complètement la sucrase. La même quantité d'acide cyanhydrique suffirait, d'après Jacobson, pour paralyser entièrement les catalases du pancréas ou des amandes amères, dont la fonction est de décomposer l'eau oxygénée.

A l'inverse de la précédente, une diastase oxydante, la laccase, est surtout sensible aux acides; voici les nombres trouvés par M. G. Bertrand :

Acide sulfurique.	0	Activité.	100
—	$\frac{1}{10.000.000}$	—	91
—	$\frac{1}{8.000.000}$	—	75
—	$\frac{1}{4.000.000}$	—	60

ces nombres sont encore plus faibles que ceux qui correspondent à la sucrase. La sensibilité des diastases nous apparaît donc comme un phénomène d'ordre général.

Tient-elle à leur origine vitale (car ces diastases ont été retirées de matières vivantes) ou à leur mode d'action ? Pour répondre à cette question, il suffira de rechercher si la même propriété appartient encore aux diastases artificielles, aux *catalyseurs* que nous savons produire par synthèse. Si la réponse est affirmative, c'est évidemment que l'origine des diastases n'est aucunement la cause première de leur sensibilité, et que celle-ci est, par suite, de nature fonctionnelle et inhérente à leur mode d'action, toujours le même quelle que soit leur provenance.

Un exemple de catalyseur artificiel va nous donner immédiatement des nombres comparables aux précédents. Bredig a trouvé que le platine colloïdal, obtenu en faisant passer l'arc électrique entre deux tiges de platine plongées dans l'eau, a le pouvoir de décomposer l'eau oxygénée, par catalyse, avec une grande rapidité. Ces solu-

tions de platine peuvent être *empoisonnées*, comme les diastases naturelles ou les organismes, par un certain nombre de substances, et leur sensibilité vis-à-vis de ces substances est extrêmement grande. Ainsi l'addition de $\frac{1}{10.000.000}$ d'hydrogène sulfuré dans un cas, de $\frac{1}{200.000.000}$ de sulfure de sodium dans un autre cas, a suffi à réduire très notablement l'activité de ce platine. L'iode, le bichlorure de mercure (sublimé), le phosphore ont aussi une action paralysante très puissante ; mais la plus forte de toutes appartient à l'acide cyanhydrique, dont un *milliardième* suffit à diminuer de moitié la quantité d'eau oxygénée décomposée par le platine.

D'autres catalyseurs manifestent une sensibilité du même ordre. Ainsi, une solution d'hydrate ferrique de Graham, qui peut, elle aussi, catalyser l'eau oxygénée, se montre, dans certaines conditions, sensible à la présence de $\frac{1}{5.000.000}$ de ferrocyanure de potassium. Dans d'autres cas, la délicatesse d'un catalyseur a été constatée sans qu'on puisse la mesurer exactement ; ainsi, dans la préparation de l'acide sulfurique par la *méthode de contact*, qui consiste à faire passer un mélange d'acide sulfureux et d'air sur un corps poreux (l'expérience se fait, dans les laboratoires, avec de la mousse de platine), une des difficultés de la pratique industrielle a été d'empêcher l'empoisonnement du catalyseur par les impuretés contenues en très faibles quantités dans l'acide sulfureux.

Nous voici parvenus à un point où la compréhension des phénomènes est beaucoup plus facile. En effet, au lieu d'un être vivant tout entier, nous n'avons plus en face de nous que des catalyseurs inorganiques, dont nous pouvons connaître la composition ; si nous parvenons à découvrir la cause de leur sensibilité, la marche que nous avons suivie rend extrêmement probable que cette cause sera encore celle qui agit sur les phénomènes vitaux.

Les chimistes sont tellement habitués à voir les composés réagir les uns sur les autres en proportions comparables, presque à poids égaux, qu'il leur semble toujours impossible qu'un phénomène dans lequel ces proportions n'existent plus soit un phénomène chimique ordinaire. Pour expliquer l'action de très faibles doses de certaines substances, ils se sont assez généralement détournés des explications purement chimiques ; les théories les plus diverses et les plus nuageuses ont été émises, et il faudrait, pour les discuter, un gros volume qui finalement n'aboutirait à aucune conclusion, car ces théories sont en général si bien arrangées qu'elles ne laissent aucune prise à la critique. Nous allons voir qu'elles sont, de plus, inutiles, et qu'il n'y a pour le moment aucune raison ne ne pas s'en tenir à la plus simple d'entre elles, qui consiste à voir dans ces empoisonnements des phénomènes chimiques ordinaires.

Dans une expérience de Bredig, un milliardième d'acide cyanhydrique suffit, comme nous l'avons vu, à diminuer de moitié l'activité cata-

lytique du platine. Mais il faut bien remarquer que la quantité de platine est aussi excessivement petite ; dans cette expérience, elle n'est que le $\frac{1}{500.000}$ du poids du liquide. Si nous tenons compte de ce que le poids atomique du platine est d'environ 200, celui de l'acide cyanhydrique de 27, nous verrons que 1 molécule de cet acide a paralysé à moitié 200 atomes de platine, ou, si l'on veut, qu'elle en a empoisonné complètement la moitié de 200, ou 100. La disproportion, comme on le voit, n'est pas aussi considérable qu'on pourrait le croire ; et remarquons que ce chiffre de 100 est un maximum, car il est calculé dans l'hypothèse où *tous* les atomes de platine participent à la catalyse, hypothèse que d'autres expériences rendent tout à fait invraisemblable. L'action catalytique semble, en effet, limitée à la surface du métal ; et quoique le platine colloïdal de Bredig soit formé de grains extrêmement fins (environ 0,05 μ de diamètre) il s'en faut de beaucoup que tout le métal y soit à la surface, et, en faisant le calcul, on trouve que le nombre d'atomes superficiels est tout au plus égal à 5 p. 100 du nombre total. Finalement, le nombre de molécules d'acide cyanhydrique nécessaires à l'empoisonnement du platine devient très voisin du nombre d'atomes de platine actifs, comme il doit arriver s'il s'agit d'une réaction chimique ordinaire[1].

Il existe, d'ailleurs, des cas où cette réaction

1. Des expériences de Kastle et Lœwenhart sont en faveur de cette explication, qu'ils soutiennent depuis longtemps.

chimique est indiscutable, quoiqu'elle paraisse aussi peu vraisemblable a *priori*. Si on remplace le platine par une solution d'oxyde de fer de Graham (obtenu par hydrolyse et dialyse du chlorure) qui, elle aussi, catalyse l'eau oxygénée, on obtient des nombres tout à fait du même ordre. Une molécule de ferrocyanure de potassium réduit d'un tiers l'activité de 1.400 atomes de fer dans la solution étudiée, ou, si l'on veut, en paralyse complètement le tiers de 1.400 ou environ 500. La disproportion est encore plus grande qu'entre l'acide cyanhydrique et le platine, et pourtant cet empoisonnement du composé de fer est le résultat d'une double décomposition ordinaire du type le plus simple. L'expérience montre seulement que sur 300 atomes de fer présents dans le liquide il n'y en avait que *un* qui fût actif : les 299 autres étaient absolument inertes.

Voici un second cas aussi net, quoique la nature de la réaction n'y soit pas aussi bien connue. Dans une expérience de G. Bertrand, un dix-millionième d'acide sulfurique a diminué d'un dixième l'activité de la laccase : si l'on tient compte de ce que le liquide ne contenait que $\frac{1}{10.000}$ de cette diastase; que l'élément actif de celle-ci est le manganèse, dont elle ne contient que moins de 0,2 p. 100, on trouve finalement qu'une molécule d'acide sulfurique paralyse complètement un demi atome environ de manganèse. La disproportion apparente est entièrement évanouie, et la formation de sulfate de manganèse, pratiquement dénué d'action oxydante, rend par-

faitement compte du phénomène observé par une réaction chimique des plus simples. Enfin, dans beaucoup d'autres cas sur lesquels M. Dony-Hénault a récemment attiré l'attention, le fonctionnement d'une diastase exige la présence d'un très faible excès d'acide ou d'alcali, et la sensibilité de cette diastase aux alcalis ou aux acides résulte seulement de la neutralisation de ce léger excès, c'est-à-dire encore d'une réaction chimique. Cette explication est-elle valable aussi dans le cas des êtres vivants? Ici ce n'est plus, comme dans tous les cas précédents, sur un poids minime de matière que réagit la dose extrêmement faible de poison, et nous ne pouvons réduire la disproportion observée comme nous l'avons fait pour les diastases. Mais nous avons un autre moyen d'y parvenir. Un cheval de 500 kilos, avons-nous vu, est sûrement tué par six milligrammes de toxine tétanique, soit $\frac{1}{80.000.000}$ de son poids. Mais est-ce bien le poids *total* de l'animal qu'il faut considérer? Il n'est pas nécessaire, pour qu'il meure, que l'activité de toutes ses cellules soit détruite, pas plus qu'il n'est nécessaire qu'une pendule soit entièrement fracassée pour qu'elle s'arrête. Il suffit qu'un organe important ne puisse plus fonctionner, et le poids de cet organe peut être une fraction très petite du poids total. Parmi ces organes, qui ne doivent pas s'arrêter, ne fût-ce qu'un instant, il faut évidemment ranger les cellules nerveuses, ou bien celles des muscles du cœur ou des muscles respiratoires. Puisque nous parlons ici de toxine tétanique,

considérons les cellules nerveuses qui ont d'après une expérience célèbre de Wassermann, une affinité spéciale pour cette toxine. Le système nerveux total d'un cheval de 500 kilos ne doit pas peser plus de un kilo[1], représentant seulement 200 grammes de substance sèche. Ce n'est donc pas sur 500 kilos, mais seulement sur 200 grammes que la toxine doit agir, et la toxicité (si nous admettons que la toxine n'agit que sur le système nerveux) tombe de 80.000.000 à 33.000. Encore ce nombre est-il calculé en supposant que *toute la masse* nerveuse est paralysée : ceci n'est évidemment pas nécessaire, et il suffit qu'une fraction du système nerveux soit mise hors d'usage pour que la mort s'ensuive[2]. Si nous évaluons cette fraction à 5 pour 100 (ce qui ferait encore, pour le cheval, le volume d'un œuf) la toxicité tombe à moins de 2.000. D'autres considérations permettraient encore de réduire ce nombre, mais cela même n'est pas utile ; nous venons de voir en effet que l'acide sulfurique est en état de paralyser chimiquement près de 1.000 fois son poids de laccase et que par suite sa toxicité par rapport à cette laccase est 1.000. Ce nombre n'est pas même doublé pour la toxine : l'écart est trop faible pour que nous renoncions à invoquer une réaction chimique, et à donner des faits une explication qui a au moins pour elle le mérite

1. Le poids du cerveau seul est d'environ 700 grammes. Il faut tenir compte de ce que tout dans cette masse n'est pas tissu nerveux : il y a les parois des vaisseaux, les gaines isolantes, etc...

2. Le bulbe, par exemple, qui n'est qu'une faible portion de la masse cérébrale.

de la simplicité. Nous considérerons donc la sensibilité des organismes en général comme due à des actions chimiques ordinaires intervenant entre les substances qu'ils renferment normalement et celles en présence desquelles ils peuvent se trouver occasionnellement.

Comment, maintenant, le poison ainsi combiné à certaines cellules va-t-il agir? Il peut le faire de deux manières, soit en détruisant simplement ces cellules, une fois pour toutes, soit par une action diastasique plus lente. Dans le premier cas, il y aura combinaison du principe absorbé avec certains éléments de la cellule, dont le fonctionnement se trouvera arrêté. C'est ce qui semble se produire, par exemple, avec le chloroforme; il se fixe vraisemblablement sur certaines cellules ou certaines parties des cellules, qu'il paralyse momentanément : mais heureusement il se fixe par un lien assez fragile, à la façon d'une mauvaise teinture qui ne supporte pas le lavage, et peu à peu il est entraîné et éliminé par le sang. Un poison qui agirait comme le chloroforme, mais qui agirait surtout sur d'autres cellules — qui paralyserait, par exemple, celles qui commandent le mouvement du cœur — et qui serait plus solidement fixé, amènerait la mort presque instantanément : c'est peut-être ce qui se produit avec les impuretés qui, existant en très petite quantité dans le chloroforme, en rendent parfois l'usage si dangereux.

Dans d'autres cas l'action chimique est pour ainsi dire à deux degrés, et elle est alors plus lente : la réaction initiale met hors d'état des

diastases essentielles, et c'est la cessation de leur travail qui amène la mort. C'est le cas de l'oxyde de carbone ou de l'hydrogène sulfuré, qui sont des poisons extrêmement actifs : l'oxyde de carbone se combine avec l'hémoglobine du sang et l'empêche de se transformer à l'air en oxyhémoglobine et de porter l'oxygène dans les tissus. L'empoisonnement ici résulte bien d'une simple réaction chimique, causée par une proportion très faible de matière, insignifiante par rapport au poids du corps : car toute l'hémoglobine du sang d'un homme ne peut absorber, même à saturation, plus de 2 grammes d'oxyde de carbone, ce qui donne à ce gaz un pouvoir toxique certainement bien supérieur à 100.000, la mort survenant bien avant que toute l'hémoglobine soit saturée.

Cette seconde explication des empoisonnements par des actions diastasiques peut encore être donnée quand, au lieu de poisons, nous avons à faire à des substances favorisantes, comme le zinc dans les expériences de Raulin et de Javillier. Il semble naturel de supposer que la très faible quantité de zinc absorbée par l'*Aspergillus* agit parce qu'elle exalte l'activité des diastases de cet aspergillus. Il peut, en effet, exister une de ces diastases pour laquelle le zinc soit aussi nécessaire que l'est le manganèse pour laccase. On connaît déjà des diastases organiques, d'une grande importance, qui sont sous la dépendance de quantités très faibles d'éléments minéraux : par exemple, les sels de chaux

sont indispensables à la digestion des substances albuminoïdes par le suc pancréatique. La quantité de ce suc excrétée par jour étant de 150 centimètres cubes environ, et l'addition de $\frac{1}{1.000}$ de chlorure de calcium (ou $\frac{1}{2.500}$ de calcium) étant, d'après Delezenne, suffisante pour le rendre actif, la digestion pancréatique demande tous les jours environ 6 centigrammes de calcium. Si donc le corps ne contenait pas de calcium, et s'il n'y en avait pas non plus dans les aliments, cette digestion serait entravée, à moins qu'on n'absorbât tous les jours cette dose de calcium qui n'atteint que le $\frac{1}{1.000.000}$ du poids du corps. Voici un exemple très net dans lequel une très faible quantité d'un corps minéral, indispensable à cause des propriétés diastasiques qu'elle confère à certains organes, influe sur l'état général d'un être vivant d'un poids démesurément supérieur.

Qu'il s'agisse de réactions purement chimiques ou de telles réactions suivies d'actions diastasiques, le fait fondamental reste le même : il suffit de très peu de chose pour troubler le fonctionnement d'un organisme. On peut considérer ce fait d'une autre manière que nous ne l'avons fait jusqu'ici, et le rattacher à une cause très générale.

L'hydrolyse et l'inversion du sucre de cannes peuvent être produites, comme nous l'avons vu, par une diastase naturelle, la *sucrase*, ou par un acide, de préférence un acide fort. En opérant à la température de 54°, on trouve que, dans une

solution à 20 p. 100 de sucre, l'acide sulfurique intervertit environ 70 fois son poids de sucre en une heure. A la même température et dans le même temps, la sucrase (pourtant impure) en intervertit 1.400 fois son poids, ou 20 fois plus que l'acide : l'action est tellement vive que la diastase décompose son poids de sucre *en moins de trois secondes*. Elle représente donc une forme de matière extrêmement active. Ceci est encore vrai d'une autre, de la pepsine par exemple : il en suffit, pour chaque digestion, d'une quantité très petite, et si on cherche à la remplacer par un autre principe actif, par l'acide chlorhydrique par exemple, qui digère comme elle, c'est-à-dire qui liquéfie les matières albuminoïdes solides, on voit qu'il faut, pour arriver au même résultat dans le même temps, une quantité beaucoup plus considérable de cet acide Ce caractère est général : l'état diastasique confère à la matière une puissance de travail extrêmement grande.

Il en résulte que, pour exercer leurs fonctions, les êtres vivants n'ont besoin de sécréter qu'une quantité de diastase très petite par rapport à leur poids. Leurs besoins, en effet, sont d'une manière générale en rapport avec ce poids, c'est-à-dire qu'ils ont besoin, pour se maintenir en vie, de quantité de substances grossièrement proportionnelles à leur taille. La transformation de ces substances incombe aux diastases, et comme il suffit, ainsi que nous venons de le voir, d'une quantité relativement très petite de ces dernières, il est tout à fait inutile que l'organisme en sécrète

de grandes quantités. D'une façon générale, le poids total des diastases contenues dans un organisme ne sera donc qu'une fraction minime du poids total.

La vérification expérimentale de cette déduction n'est pas facile ; on ne peut généralement obtenir le poids de diastases produit par un être, le dosage pondéral de ces substances étant impossible en l'état actuel de la science. On peut cependant voir, de diverses manières, que ces poids sont très petits. Pour un homme, la somme des diastases digestives sécrétées n'est que de quelques grammes par jour. Il est vrai que la digestion de l'homme est lente et que le volume des aliments quotidiens n'est qu'une petite partie du volume du corps : mais pour l'*Aspergillus*, qui consomme en une journée plus que son poids de sucre, la même objection ne peut être faite : et la sucrase, qui est une de ses diastases digestives, ne fait certainement pas le millième du poids de la plante, et peut-être pas le dix-millième. Si la respiration, c'est-à-dire l'élimination de l'acide carbonique, était chez l'homme le résultat de la présence de la laccase, (ce qui est fort peu probable d'ailleurs), il suffirait pour expliquer les phénomènes observés que cette laccase contînt moins de un décigramme de manganèse, ou un millionième seulement du poids du corps. Tous ces nombres, on le voit, sont extrêmement faibles, et il est probable qu'ils ne sont pas notablement plus grands pour la plupart des autres diastases.

Il est tout naturel alors que les organismes

vivants soient aussi fragiles. Si l'une des fonctions essentielles du corps humain est déléguée à un décigramme d'une substance particulière, un autre décigramme d'une autre substance capable de se combiner à la première suffira à amener une perturbation profonde de tout l'organisme et peut être la mort, de même que, dans le système monarchique, il suffit, pour qu'un pays de quarante millions de corps aille au diable, que le premier en rang de ces corps soit travaillé par la dyspepsie ; ou que, dans tout autre système, il suffit qu'un citoyen influent et placé près des interrupteurs ait envie de s'amuser pour que la moitié de Paris soit plongée dans l'obscurité. Les atomes qui se sont rassemblés pour former un organisme vivant souffrent des mêmes maux que les hommes groupés en villes et en Etats, et l'ensemble en est d'autant plus fragile qu'il y a plus de fonctions essentielles distinctes, dont chacune a dû être confiée à un plus petit nombre d'entre eux.

Revenons un peu en arrière. Nous avons fait l'hypothèse que la sensibilité des êtres vivants à l'action du poison était due à ce que ces poisons, au lieu de se répandre uniformément dans leur corps, se concentraient dans certains de leurs organes sur lesquels ils exerçaient une action destructive. Cette explication soulève une difficulté, qu'il nous faut maintenant résoudre. Dans les cas où le poison agit, par exemple, sur le système nerveux, nous sommes obligés d'admettre qu'il se fixe intégralement ou presque intégrale-

ment, sur les cellules nerveuses, sans être retenu par les autres. N'y a-t-il pas invraisemblance à ce qu'il en soit ainsi, et à ce que 9 milligrammes de toxine tétanique injectés à un cheval, viennent se fixer finalement sur 50 grammes de matière cérébrale suivant le calcul qui a été fait, sans être retenus par la masse 10.000 fois plus considérable des autres tissus du corps? Cette toxine, en effet, est entraînée par le sang dans tous les tissus : notre hypothèse doit nécessairement se compliquer d'une autre, d'après laquelle certaines cellules seulement auraient la propriété de l'arrêter et de la fixer définitivement, même à la dose infiniment petite à laquelle elle se trouve dans le sang, tandis que toutes les autres la laisseraient passer, sans en absorber la moindre trace, de manière à ce que cette toxine se trouve, après un certain temps, concentrée dans les cellules spéciales dont elle amène la déviation ou la paralysie. Cette nouvelle hypothèse doit être justifiée expérimentalement de deux manières : d'abord, en montrant que certaines cellules ont le pouvoir de fixer certaines substances sans en laisser échapper aucune trace, même à un état d'extrême dilution : ensuite, qu'il y a entre les cellules d'un même organisme des différences suffisantes pour que le poison ainsi fixé par un certain organe soit délaissé, complètement ou à peu près, par les organes voisins.

La première justification ne rencontre pas de difficulté. On connaît de très nombreux exemples dans lesquels une substance solide absorbe une matière dissoute, en trace même beaucoup plus

faibles que les toxines dans le sang. Ainsi, d'après M. A. Gautier, le sesquioxyde de fer précipité absorbe l'acide arsénique (et probablement aussi l'acide phosphorique) jusqu'à n'en laisser dans le liquide que moins *d'un milliardième*. Mais c'est surtout chez les substances d'origine végétale ou animale que ce pouvoir d'absorption est le plus élevé. Une très jolie expérience consiste à faire flotter un écheveau de soie blanche dans une solution d'éosine (encre rouge) tellement étendue que sa couleur n'est presque plus perceptible (un millionième) : pourvu qu'il y en ait un volume suffisant, en quelques heures la soie se teint de rose, ayant absorbé l'éosine même dans cette solution extrêmement étendue[1]. L'acide picrique, qui sert à soigner les brûlures, est absorbé par la peau ou par la soie : cette dernière, d'après Walker, se charge de 1,3 p. 100 d'acide picrique dans une solution qui n'en contient que 0,006 p. 100, et le pouvoir absorbant augmente encore quand la dilution s'accroît : on peut, en extrapolant les nombres de Walker, calculer que si on dissout un milligramme d'acide picrique dans un mètre cube d'eau, et si on y fait flotter 10 grammes de soie, elle absorbera les trois quarts de l'acide, dont la concentration dans la soie sera environ 300.000 fois plus grande que dans l'eau à la fin de l'expérience. Le pouvoir absorbant de la soie pour l'acide picrique n'est cependant pas particulièrement grand ; il est beaucoup

1. La même expérience réunit avec la fuchsine et surtout avec le vert malachite. La soie se colore encore en vert clair dans une solution de vert malachite au cinquante-millionième.

plus considérable pour d'autres substances telles que l'éosine ou le vert malachite.

Ce pouvoir absorbant spécifique (qui semble dû à la nature colloïdale des substances absorbantes) se manifeste encore dans d'autres circonstances. Nous avons vu que, dans les expériences de M. Javillier, l'Aspergillus niger est sensible à la présence de traces extrêmement faibles de zinc. Or, si on fait une culture de cet aspergillus sur 250 centimètres cubes de liquide nutritif, contenant un demi-milligramme de zinc ou $\frac{1}{500.000}$, et si on récolte la plante développée, qui pèse 4 grammes à l'état sec, on trouve qu'elle a absorbé intégralement le zinc contenu dans le liquide. En tenant compte des poids relatifs et aussi des erreurs expérimentales possibles, il semble que la concentration en zinc, qui est montée à $\frac{1}{10.000}$ environ dans les cellules de l'Aspergillus, soit tombée à moins de $\frac{1}{10.000.000}$ dans le liquide restant : le pouvoir absorbant est donc encore ici manifeste. Des expériences de M. Devaux, que je regrette de ne pouvoir citer plus en détail, ont montré que certaines plantes peuvent absorber le cuivre dans des solutions qui n'en contiennent que moins de un cent-millionième. Enfin, je rappellerai qu'un certain nombre de plantes marines (varechs) fixent en abondance l'iode et l'argent dont il n'existe que des traces dans les eaux de la mer : cet exemple vient à l'appui des précédents.

Remarquons d'ailleurs qu'une industrie tout

entière, celle de la teinture, est fondée sur cette propriété d'absorption. A part les cas dans lesquels le procédé de teinture consiste à produire au sein des fibres textiles un précipité insoluble (Bleu de Prusse, noir d'aniline), la technique suivie consiste en général à plonger les tissus dans une solution de matières colorantes qui devront être absorbées par ces tissus. Cette absorption doit se faire dans des proportions telles que la couleur, une fois fixée, ne soit pas enlevée par de simples lavages à l'eau, sans quoi la teinture serait mauvaise. On y arrive en la choisissant telle que l'eau n'en enlève que de très faibles traces. Il est évident, d'après ce qui a été dit plus haut, que pour des tissus de soie l'acide picrique, et beaucoup mieux encore l'éosine ou le vert malachite satisfont à cette condition, puisqu'un volume énorme d'eau passant sur de la soie teintée de ces matières n'en enlèverait qu'une fraction insignifiante.

Il est donc possible d'admettre par analogie que certaines cellules de l'organisme puissent fixer un poison excessivement dilué dans le sang. Il nous reste à voir si ce poison se fixera réellement sur certaines cellules de préférence à d'autres. Ici encore la pratique de la teinture va nous répondre, et ce rapprochement n'a rien d'extraordinaire, car la fixation des toxines sur les cellules est, au fond, probablement assez analogue à un phénomène de teinture.

On sait ce qu'on entend par un *mordant :* c'est une substance qu'on applique sur certains points d'un tissu sur lesquels on veut qu'une couleur

prenne ou *morde*. Aux points mordancés, la couleur se fixe, et ne peut plus être enlevée par lavage, tandis que les fonds, qui n'ont reçu aucune préparation, s'ils se colorent aussi dans le bain de teinture, redeviennent blancs aussitôt qu'on les passe à l'eau. Il existe donc bien des substances (tissus mordancés) qui fixent les couleurs que d'autres (tissus non mordancés) négligent. Du reste, sans même avoir recours aux mordants, la même preuve résulte de ce qu'une même matière colorante peut teindre un tissu et non un autre ; l'acide picrique teint la peau, il ne teint pas le coton, et du coton qui y a séjourné redevient blanc en quelques minutes dans l'eau courante, tandis que les doigts plongés quelques secondes dans la même solution conservent leur coloration jaune pendant plusieurs jours. Enfin, les micrographes savent obtenir des préparations colorées de microbes et de cellules dans lesquelles plusieurs couleurs (quelquefois trois) existent à la fois, les unes fixées sur certains éléments de la préparation, les autres sur d'autres. Le fait qu'on peut voir à côté l'un de l'autre un microbe rouge et une cellule bleue est une preuve certaine des propriétés sélectives des cellules et des teintures.

Jusqu'à quel point peut-on admettre que le même phénomène se produit pour les poisons et les toxines? Évidemment les conditions ne sont pas les mêmes, et il y a peut-être moins de distance entre deux cellules d'un même organisme qu'entre la soie et le coton, l'une matière azotée, l'autre simple hydrate de carbone. Cependant, si

l'on tient compte de ce que les différentes cellules sont formées de substances en réalité assez différentes par leur composition chimique, on trouvera qu'il n'y a rien d'invraisemblable à ce qu'elles puissent manifester, vis-à-vis de certains poisons (ou au contraire vis-à-vis de certaines substances favorisantes) une spécificité presque absolue[1]. Il n'est donc pas impossible qu'une trace de poison, introduite dans l'organisme et entraînée par le sang, passe sans s'arrêter devant tous les organes, sauf un seul, et vienne peu à peu se condenser dans celui-ci et s'y combiner avec les substances qu'il contient normalement, en amenant ainsi une profonde perturbation des fonctions dévolues à cet organe. La vérification de cette hypothèse est malheureusement très difficile, car ces poisons, et en particulier les toxines microbiennes, ont souvent une composition chimique trop voisine de celle des cellules elles-mêmes pour qu'on puisse les caractériser nettement; et les lésions microscopiques ou macroscopiques que l'on observe dans les cas d'empoisonnement peuvent rarement être interprétées au point de vue des réactions chimiques qui ont pu les déterminer.

1. Les expériences, déjà mentionnées, de M. Devaux, l'ont montré dans quelques cas particuliers.

CHAPITRE XI

QUELQUES CARACTÈRES CHIMIQUES DE LA VIE ET DE LA MORT

A mesure que nous avançons dans l'étude des êtres vivants, nous découvrons que nous pouvons ramener un nombre de plus en plus grand de leurs fonctions à des phénomènes chimiques ou physico-chimiques, et nous sommes de plus en plus tentés de considérer leur étude comme se réduisant à celle de ces phénomènes. Quoique ce travail de réduction ne soit pas très avancé, comme on a pu le voir par ce qui précède, il n'y a pas de raison de supposer qu'il doive s'arrêter un jour à une limite déterminée et infranchissable. Quand il sera achevé, ce sera, en dernière analyse, à la chimie ou à la physico-chimie qu'il faudra demander ce qu'elles nous apprennent de la vie et de la mort. Dès à présent la question peut leur être posée, et la chimie y répond immédiatement qu'elle n'est en mesure de définir aucun de ces deux mots. Elle est impuissante à établir une différence essentielle entre un corps animé et un cadavre, et seule la supposition d'une âme immatérielle, sur la nature de laquelle elle aura

à s'expliquer, peut la sauver d'établir entre eux une identité complète.

Tout ceci résulte, presque avec évidence, des faits actuellement connus. Parmi ces faits, il y a tout avantage à laisser momentanément de côté tous ceux qui se rapportent aux plantes ou aux animaux supérieurs, beaucoup trop compliqués, et dont la vie, comme la mort, s'accompagne de phénomènes purement mécaniques [1] que la chimie n'a pas à considérer. Il vaut mieux commencer par les organismes inférieurs et principalement les unicellulaires, dont la vie nous est mieux connue, et peut être considérée comme un abrégé de la vie de tous les autres.

J'ai déjà décrit [2] l'expérience de Buchner, qui consiste à broyer des cellules de levure de bière et à les presser pour en extraire le suc cellulaire. Celui-ci garde, comme nous l'avons vu, un grand nombre des propriétés de la levure vivante ; il hydrolyse le sucre de cannes, il dédouble le glucose en acide carbonique et en alcool ; il respire, c'est-à-dire qu'il dégage spontanément de l'acide carbonique, et cette respiration est accompagnée, comme chez la levure vivante, de la disparition du glycogène accumulé dans la cellule pendant la période de vie active. Il semble même qu'il soit capable d'assimiler le sucre et de le transformer en substances plus complexes ; en tout cas, la présence de ce sucre lui permet de conserver ses propriétés plus longtemps, comme s'il avait

1. La respiration ou la circulation du sang, par exemple.
2. Page 114.

pour lui, de même que pour la levure, une valeur alimentaire.

Le suc extrait de la levure en conserve donc les propriétés principales ; la seule qui soit absolument détruite en lui est la propriété de se reproduire. La levure étant un être vivant, le chimiste est obligé d'admettre que le suc de levure en est un aussi, puisqu'il conçoit ces êtres comme un ensemble de fonctions et que, de toutes les fonctions du premier, la seule qui manque au second est la faculté de reproduction, qui n'est aucunement nécessaire à la vie et que beaucoup de plantes et d'animaux (les abeilles ouvrières par exemple) ne possèdent pas.

Voici donc un premier exemple d'une cellule indiscutablement vivante et d'une matière privée de vie au sens ordinaire du mot, entre lesquelles la chimie ne découvre aucune différence essentielle qui puisse servir de définition à la vie. On pourrait en donner bien d'autres ; c'est ainsi que beaucoup d'organes des animaux supérieurs, isolés après la mort du reste du corps, n'en conservent pas moins pendant un certain temps leurs fonctions, à peu près identiques à ce qu'elles sont pendant la vie. Si l'on injecte, dans l'artère d'un rein d'herbivore, du sang contenant un mélange d'acide benzoïque et de glycocolle, il en ressort chargé d'acide hippurique, formé par l'union de ces deux substances par un mécanisme qui fonctionne ainsi après la mort comme pendant la vie. On trouve de même que le foie séparé du corps continue à excréter de l'acide urique, et, si on lui fournit des sels ammoniacaux, à faire la

synthèse de l'urée à partir de cette ammoniaque. D'après Lépine et Seegen, le foie pourrait même, dans ces conditions, former du glycogène aux dépens des peptones, comme il le fait, suivant Claude Bernard, pendant la vie. Ainsi, il semble probable que toutes les fonctions qui ne sont pas exposées à une disparition rapide par asphyxie, causée par l'arrêt de la respiration ou de la circulation, sont conservées telles quelles après la mort. La chimie ne peut donc établir une différence essentielle entre un organe vivant et un organe mort au sens ordinaire du mot. L'expérience faite sur la levure[1] nous permet de pousser ceci plus loin, et nous fait admettre comme très vraisemblable que, si nous savions isoler de ces organes les cellules douées d'un mode particulier d'activité, celle-ci survivrait, au moins en partie, au broyage de ces cellules et se retrouverait dans le suc qui en serait extrait par pression.

Ce suc est donc, aux yeux de la chimie, une matière vivante aussi bien que l'organisme dont il provient. Son activité est due à ce qu'il contient une ou plusieurs diastases ; quand nous saurons (ce qui ne peut manquer d'arriver) reproduire artificiellement ces diastases, nous pourrons composer un mélange ayant les mêmes propriétés que le suc extrait des cellules vivantes, et, de nouveau, la chimie ne nous permettra d'établir aucune différence essentielle entre ce mélange et le produit naturel, c'est-à-dire entre

1. Et sur d'autres organismes microscopiques, dont on a pu aussi extraire de la diastase par broyage (Mazé, Stoklasa, etc.)

ce mélange et l'organisme correspondant, les fonctions étant les mêmes de part et d'autre.

Ainsi, si nous considérons l'ensemble des fonctions présentées par un être vivant *à un instant donné* (et l'on va voir l'importance de cette restriction), la chimie (non pas celle d'aujourd'hui si l'on veut, mais celle de demain) nous impose cette conclusion qu'aucune de ces fonctions prises isolément, ni aucune combinaison d'un nombre quelconque de ces fonctions, n'est caractéristique de la vie. Celle-ci, si on la définit comme l'état d'un être *à un instant donné*, échappe donc complètement à la chimie. Bien entendu, il ne faut pas prendre ici le mot *instant* au sens mathématique ; il désigne seulement une durée assez courte, qui peut pour le moment n'être pas précisée davantage. En effet, une fonction chimique consiste dans la transformation de substances les unes dans les autres, et cette transformation se fait avec une certaine vitesse : une fonction ne peut donc être appréciée et mesurée que si l'on dispose d'un certain temps pour le faire, et, lorsque je parlerai de l'état d'un être à un instant donné, il faudra entendre pendant une durée assez longue pour que toutes ses fonctions actuellement en exercice puissent être observées.

La restriction, que l'état de l'être vivant doit être considéré à un instant donné, découle, comme tout ce qui précède, directement de l'expérience. En effet, les conclusions précédentes cessent absolument d'être vraies aussitôt qu'on observe les faits pendant une durée plus longue.

Reprenons l'expérience fondamentale de Buchner, celle du broyage de la levure : il y a une différence considérable entre la durée de la vie de cet organisme et celle du suc extrait par pression. Celui-ci perd en quelques jours son pouvoir de faire fermenter le sucre, tandis que la levure le conserve pendant beaucoup plus longtemps ; on a pu rajeunir des levures qui avaient été conservées sans se reproduire pendant vingt-cinq ans, et, s'il s'agit là d'un cas un peu exceptionnel, des survies de dix ans sont tout à fait normales, c'est-à-dire que la vie de la levure se prolonge pendant une durée mille fois plus longue que celle du suc cellulaire [1]. Pour les organes animaux qui, comme nous l'avons vu, conservent leurs fonctions diastasiques après qu'on les a séparés du corps, on observerait encore une décrépitude beaucoup plus rapide que celle des organes en vie; mais ici on n'en pourrait rien déduire, l'arrêt de la circulation venant compliquer les choses, tandis que, dans le cas de la levure, on ne peut faire aucune objection de cet ordre. Ainsi, si nous ne découvrons pas de caractère essentiel de la vie dans l'état d'un être à un instant donné, nous sommes amenés à nous demander si nous n'en trouverions pas, au contraire, dans la comparaison de deux états du même être suffisamment éloignés l'un de l'autre dans le temps.

Il faudra, pour cela, préciser la différence que

1. Il s'agit ici, bien entendu, de la longévité d'*une cellule déterminée* et non pas de celle de l'espèce, qui est pratiquement indéfinie.

nous venons d'entrevoir, car si la longévité de la cellule a disparu dans le suc cellulaire très altérable, elle reparaîtrait dans un mélange de diastases artificielles ayant les mêmes fonctions que la cellule elle-même, de tels mélanges étant généralement beaucoup plus stables que les diastases naturelles. Ainsi, la considération de cette longévité est insuffisante à elle seule. Si nous analysons les expériences par lesquelles on l'a démontrée dans les cellules vivantes, nous verrons tout de suite que, pendant le temps qu'ont duré ces expériences, l'état de ces cellules a été bien loin d'être constant. Chez la levure vieillie par exemple, les modifications chimiques sont évidentes, car la teneur brute en azote y est diminuée de 12 p. 100 à moins de 3 p. 100, tandis que d'un autre côté les matières grasses y sont augmentées de 5 à 6 p. 100 jusqu'à 30 et 50 p. 100. En même temps que ces changements s'accomplissent, les fonctions s'atténuent et disparaissent peu à peu, et, si l'on veut se servir à nouveau de la levure vieillie, il faut la rajeunir en la conservant quelque temps dans un milieu nutritif approprié, qui la rétablit sensiblement identique, même après des années, à ce qu'elle était au début. Ainsi, la longévité ne consiste pas précisément dans le maintien des fonctions pendant une très longue période, mais plutôt dans le fait que ces fonctions peuvent au contraire s'affaiblir jusqu'à disparaître, pour renaître ensuite avec la même activité qu'elles avaient tout d'abord. Ni le suc de levure, ni les mélanges artificiels que nous pourrions préparer

ne présentent les moindres traces de cette propriété ; nous pouvons donc la considérer, au moins provisoirement, comme absolument caractéristique de la vie.

Cette propriété n'étant ni une matière, ni une fonction chimique, mais quelque chose d'immatériel, nous devons maintenant rechercher ce qui lui correspond dans la matière ou les fonctions chimiques de la cellule. Il est assez difficile de savoir, en raison du petit nombre d'expériences faites à ce sujet, en quoi précisément consiste la différence de longévité entre la cellule et le suc cellulaire. On pourrait lui assigner deux causes principales : ou bien, elle tient à ce que tous les éléments du globule n'existent pas dans le suc, qui n'en contient que les éléments liquides ; ou bien, elle tient à ce que la structure des cellules a été détruite par le broyage. La chimie malheureusement n'a pas encore abordé de front l'étude de ces questions : elles sont encore du domaine de la physiologie ou de l'histologie, dont les résultats ne peuvent être utilisés pour le but que nous poursuivons. On peut cependant citer comme assez nette une expérience de Godlewski et Polszenius, d'après laquelle des pois verts, qui, immergés dans l'eau, dégagent spontanément de l'acide carbonique, cessent d'en dégager lorsqu'on les broie. Comme le dégagement d'acide carbonique (par respiration intramoléculaire) se fait sous l'influence d'une diastase, cette expérience semble prouver que même un mécanisme très simple comme l'action d'une

diastase est sous la dépendance d'une structure particulière. En la rapprochant des faits bien connus, d'après lesquels la conservation, la régénération et la reproduction de la cellule sont sous la dépendance du noyau, c'est-à-dire d'une particularité de structure, on est conduit à penser que, si l'état d'une cellule à un instant donné est déterminé uniquement par les diastases qu'elle contient, les variations ou au contraire le maintien de ces fonctions est régi par une architecture spéciale qui est détruite dans le suc cellulaire, et que ne possèdent pas les mélanges artificiels de diastases obtenues par synthèse.

Que peut être cette architecture, et comment agit-elle pour modifier les fonctions, les laisser s'atténuer jusqu'à devenir insensibles, lorsqu'elles ne trouvent pas à s'exercer, et les faire réapparaître quand elles redeviennent nécessaires ? A toutes ces questions nous ne sommes en mesure de donner que des réponses très vagues, ou même nous n'avons rien à y répondre et il faut nous contenter de simples remarques.

En examinant de près la constitution de la cellule, on voit qu'il y a non pas une seule, mais trois architectures à considérer, existant ensemble et superposées l'une à l'autre : microscopique, ultramicroscopique, atomique. La première correspond à la division de la cellule en plusieurs parties : membrane, protoplasma, vacuoles, noyau avec sa structure propre assez compliquée et variable d'une cellule à l'autre. C'est celle que l'on découvre par l'étude histologique, avec cette

réserve qu'elle est probablement plus fine que l'histologie ne peut le montrer, en raison de l'imperfection de nos microscopes, qui ne perçoivent pas les détails de dimension inférieure à quelques dix-millièmes de millimètre, considérables encore par rapport à la taille de la cellule. Cette première architecture est suffisamment connue pour que je n'y insiste pas davantage.

La deuxième l'est moins, et surtout elle l'est depuis beaucoup moins longtemps. Nous avons déjà vu que la plupart des substances vivantes sont des *colloïdes*, et que ces colloïdes se distinguent des autres substances en ce que leur élément constitutif est la *micelle* au lieu d'être la molécule chimique ordinaire. La micelle se présente comme un assemblage d'atomes en nombre considérable (en général plusieurs milliers), cet assemblage étant beaucoup plus gros qu'une molécule ordinaire, et doué de propriétés assez différentes. Ces micelles sont *ultramicroscopiques*, c'est-à-dire qu'elles sont invisibles au microscope, ayant un diamètre inférieur, souvent même très inférieur à celui que le microscope permet de percevoir ; mais elles peuvent être vues avec le perfectionnement de cet instrument que l'on a appelé l'*ultramicroscope*[1]. Les éléments histologiques les plus fins de la cellule (leur dimension ne doit pas tomber au-dessous de 0,0001 ou 0,00005 millimètre) sont encore formés d'un nombre considérable de ces micelles — autant peut-être qu'il y a de briques dans une cheminée

1. Voir page 264.

d'usine — qui y sont disposées suivant ce que j'ai appelé l'architecture ultramicroscopique.

Enfin, chaque micelle elle-même est un assemblage d'atomes rangés dans un certain ordre, et cet ordre, de même que le nombre des atomes, est variable, de telle sorte que toutes les micelles d'une même substance ne sont pas identiques, ni comme grosseur, ni comme constitution, ni comme propriétés. On voit que la constitution des êtres vivants, même unicellulaires, est en réalité fort compliquée. Si nous comparons la cellule à une maison, les trois architectures correspondent l'une à la division en chambres, cloisons, planchers, cheminées, etc... ; la seconde, à la manière dont chaque mur est bâti, pierre de taille, brique ou meulière superposés dans tel ou tel ordre ; la troisième, aux propriétés physiques et chimiques des matériaux employés.

Cette constitution, est, dans son ensemble, spécifique et héréditaire. Comme d'autre part les atomes, qui en sont les éléments, n'ont absolument rien de spécifique, étant les mêmes pour un être vivant et pour le minéral le plus inerte, on peut se demander jusqu'où descendent la spécificité et l'hérédité, c'est-à-dire si elles dépendent d'une seule architecture ou des trois, car il faut bien qu'il y ait un point où on les laisse derrière soi quand on descend de l'être total à l'atome. Suivant que la réponse sera dans un sens ou dans l'autre, nous devrons expliquer ces propriétés de manière toute différente, et le point même où nous nous arrêterons nous indiquera de quel côté nous tourner. J'ai déjà comparé une cellule

à une maison : si dans un grand incendie certaines maisons brûlent tandis que d'autres restent debout, c'est-à-dire si elles font preuve de propriétés spécifiques, c'est ou bien que la disposition intérieure (structure microscopique) n'était pas la même, et la différence entre les deux est surtout d'ordre géométrique ; ou bien que les murs et les cloisons n'étaient pas établis de la même manière (structure ultramicroscopique), de telle sorte que les uns se sont écroulés tandis que les autres restaient debout (raisons surtout physiques); ou enfin que les matériaux n'étaient pas les mêmes (structure atomique, différences chimiques). La question que nous nous posons a donc une signification très précise et très importante pour notre connaissance des êtres vivants. Or, l'expérience montre qu'il faut descendre au moins jusqu'aux micelles.

Les propriétés des micelles sont extrêmement variables. Elles dépendent, en effet, non seulement de la substance dont elles sont formées, mais aussi de leur grosseur, car deux micelles formées de la même substance, mais de grosseur différente, ne se comportent pas de même. Elles dépendent encore (et ceci est un caractère essentiel) de la nature et des propriétés de toutes les substances avec lesquelles elles sont en contact : c'est ainsi qu'elles ne sont pas du tout les mêmes, si elles se trouvent dans l'eau pure, que si elles se trouvent dans une solution saline, pas les mêmes dans une solution saline que dans l'alcool, etc... Enfin, elles varient

encore (autre caractère essentiel) avec la manière dont elles ont été formées.

Un exemple très simple, emprunté aux travaux du chimiste hollandais Van Bemmelen, le montrera de façon précise. Il est possible d'obtenir des solutions ou des précipités d'alumine, de silice, d'oxyde de fer, présentant une structure micellaire très semblable à celle des substances organisées de la cellule, et, en conséquence, un certain nombre de propriétés assez voisines aussi. Si l'on étudie ces propriétés, on ne tarde pas à reconnaître qu'elles sont très variables d'un échantillon à l'autre. Par exemple, la proportion d'eau retenue par la silice quand on la dessèche à une température déterminée change avec le mode de préparation. Si cependant on emploie toujours le même, par exemple la précipitation du silicate de soude par l'acide chlorhydrique, elle change avec la concentration des deux réactifs, leurs proportions relatives et l'ordre dans lequel on les mélange. Elle n'est pas non plus la même, si on arrive à la température considérée en montant ou en descendant, c'est-à-dire en venant de températures plus basses ou de températures plus hautes.

En résumé, on n'arrive à des micelles identiques qu'en employant des procédés identiques. Il en résulte, pour les colloïdes d'un organisme vivant, un caractère spécial : créées dans des conditions très particulières, au sein d'une cellule *déterminée*, les micelles ont aussi des propriétés *déterminées* qui ne peuvent appartenir à aucune autre micelle, soit artificielle, soit extraite

d'un autre organisme d'espèce différente ; et de même leur mode d'assemblage est déterminé, c'est-à-dire que les tissus sont formés de micelles superposées dans un ordre tel, que cet ordre est irréalisable en dehors de la cellule qui l'a établi. L'architecture ultramicroscopique et l'architecture atomique sont donc toutes les deux spécifiques et héréditaires ; et ce caractère de conservation n'a rien qui doive nous surprendre, car si nous considérons un organisme unicellulaire et toute la lignée de ses descendants, nous verrons que les micelles et les tissus de tous ceux-ci ont été formés dans des conditions sensiblement identiques, et par un mécanisme toujours le même. Ceci n'empêche pas, d'ailleurs, qu'ils ne puissent évoluer, comme une cellule peut le faire aussi, lorsque les conditions dans lesquelles il se trouve subissent une modification de longue durée, ou même peut-être subir des mutations brusques lorsque ces modifications sont brusques.

Je viens de dire que toutes les micelles d'une même descendance sont formées dans des conditions sensiblement identiques. Il semble y avoir contradiction entre cette affirmation et le fait, déjà rencontré, que l'état d'un organisme est essentiellement variable suivant son âge ou suivant le genre de vie auquel il est forcé de se plier, et que sa composition chimique totale, c'est-à-dire aussi probablement celle de ses micelles, peut varier dans de très larges limites. La contradiction n'est qu'apparente : la multipli-

cation de la cellule n'a lieu, en effet, que si elle se trouve dans des conditions favorables, c'est-à-dire si elle est prospère. Une cellule de levure par exemple, réduite à l'état d'inanition, ne se reproduit pas : si elle pouvait le faire (il suffirait pour cela que les mécanismes d'assimilation et de reproduction fussent indépendants, comme ils le sont à peu près chez l'homme, à son grand dommage), il est bien probable que ses propriétés ne se maintiendraient pas constantes avec la même exactitude pendant un aussi grand nombre de générations. Quand, après une période de misère, elle se retrouve à son aise, elle commence par se reconstituer, par revenir à peu près identique à ce qu'elle était dans sa prospérité première, et c'est alors seulement qu'elle songe à se multiplier.

Nous venons de découvrir une relation entre les propriétés héréditaires d'une cellule et la nature micellaire de ses tissus. Ses variations avec le temps et avec l'âge peuvent aussi être étudiées en rapport avec cette nature micellaire, et surtout en rapport avec une propriété des micelles que l'on pourrait appeler leur plasticité. Celle-ci consiste dans ce fait, expérimentalement établi, que les micelles peuvent abandonner certains de leurs éléments au liquide qui les entoure, ou les échanger pour d'autres, et les reprendre plus tard. Elles se comportent comme si elles étaient formées (et elles le sont réellement) d'une sorte de noyau qui en serait la seule partie fixe, noyau entouré de molécules variables par leur nombre et leur qualité. Dans la levure jeune, et plus généralement

dans tous les organes jeunes, ces molécules semblent être particulièrement abondantes[1], pour diminuer dans la vieillesse. La plasticité de la micelle résulte de la mobilité de ces molécules, qui peuvent disparaître presque complètement sans que la micelle perde son individualité : cette disparition aura lieu progressivement lorsque la micelle et l'organisme se trouveront dans des conditions de vie défavorables. Aussitôt que ces conditions redeviendront meilleures, la micelle réabsorbera tout ce qu'elle avait perdu, et pourra se retrouver identique, à peu de chose près, à ce qu'elle était au début. La seule condition pour que ce rajeunissement soit possible est que l'épuisement de la micelle n'ait pas dépassé une certaine limite, au delà de laquelle elle serait en danger de mort.

L'individualité d'un organisme, son hérédité, sa régénération après une longue période de repos, nous apparaissent donc comme liées d'une façon assez simple à sa nature colloïdale. Faut-il en conclure que ce mot explique tout, ou même qu'il explique réellement quelque chose ? Bien au contraire, il ne faut y voir que l'indication d'une direction à suivre. Ce n'est pas parce qu'on les aura rapprochées des propriétés des colloïdes, propriétés encore fort mal comprises, qu'on aura *ipso facto* rendu plus claires celles des organismes. Il est même des faits que ce

1. Ce fait se traduit par l'élévation de la pression osmotique et par la plus grande activité des actions diastasiques. Il y a des raisons de croire que ces deux caractères sont sous la dépendance l'un de l'autre.

rapprochement rend plus incompréhensibles encore : pour n'en citer qu'un exemple, on ne s'explique pas que les micelles qui naissent dans un organisme en voie de développement soient identiques aux micelles existant déjà à ce moment, car lorsqu'on veut augmenter le nombre des micelles artificielles existant dans une solution colloïdale, en en créant de nouvelles, pareilles à celles qui y sont déjà, on ne peut y parvenir et on aboutit simplement à grossir ces dernières sans les multiplier. Le mécanisme de la formation des micelles naturelles par des actions de diastases (et sont-ce bien même des diastases ?) demeure donc encore plus obscur, après que le rapprochement a été fait, qu'il ne l'était avant : les autres mécanismes n'en sont pas davantage éclairés.

Cependant, sans avoir besoin de les connaître, nous savons maintenant assez de choses pour pouvoir préciser la nature de ce que j'ai appelé en commençant l'âme d'un organisme. Cette âme est ce qui le distingue, à chaque instant, d'un organisme artificiel ayant à cet instant les mêmes fonctions que lui. Elle se manifeste en ce que cette identité de fonctions, existant à un moment donné, n'existe plus à un moment quelconque un peu éloigné du précédent. Les courbes qui expriment la vie de l'un et de l'autre sont tangentes en un point, elles ne sont pas confondues, parce que les deux évolutions ne se font pas parallèlement. Qu'est-ce que l'âme, ou le principe vital, ou la force vitale ainsi entendue ? C'est l'accord des équilibres chimiques et phy-

sicochimiques intéressant les matériaux de l'organisme, et en vertu desquels ces matériaux se créent, se développent ou se reconstituent. C'est cette âme qui, avais-je dit, distingue l'être vivant, *animé*, du cadavre : tous deux ont des fonctions, c'est-à-dire peuvent faire subir à d'autres substances des transformations chimiques[1], mais il y a entre eux cette profonde différence que les fonctions de l'être vivant sont accordées les unes avec les autres, tandis que celles du cadavre sont en désaccord, et, loin d'en assurer la conservation, en hâtent au contraire la ruine.

L'état embryonnaire de nos connaissances sur la matière vivante est cause que la chimie ne nous enseigne pas grand chose sur l'âme ainsi définie, âme qui périt avant le corps, ou plutôt dont la disparition entraîne la mort du corps. Nous ne pourrions en parler longtemps sans dépasser les limites permises à l'induction et nous égarer en pleine hypothèse, c'est-à-dire en pleine fantaisie. Cependant nous pouvons avancer encore dans un petit nombre de directions, dans lesquelles nous trouverons notre voie plus ou moins largement frayée par l'expérience. En particulier nous pouvons nous poser ces deux questions : d'où les êtres vivants tiennent-ils leur âme, et celle-ci échappe-t-elle à la synthèse ?

Par un mécanisme inconnu, les micelles créées

1. La levure tuée par la dessiccation ou par les antiseptiques (acétone) peut encore être employée comme levain de boulangerie. Elle retient donc tout au moins une propriété essentielle de la levure vivante.

à chaque instant sont identiques aux micelles déjà existantes au même point, et c'est en partie à cette propriété que les cellules de levure doivent de donner, en proliférant, d'autres cellules identiques à elles-mêmes et douées des mêmes fonctions. Toute propriété d'une cellule se transmet à ses descendants, et réciproquement toute propriété d'une cellule provient de ses ascendants. L'accord de ses fonctions, en particulier, a pour origine l'accord exactement semblable qui existait entre les fonctions de ses ascendants. L'âme d'une cellule provient donc de celle dont elle est née, cette dernière de la précédente, et ainsi de suite en remontant toujours. Il faudrait donc, pour en connaître l'origine première, remonter jusqu'à la première cellule. Le problème, ainsi posé, n'a pas de sens expérimental et n'en aura jamais, car il sera toujours impossible d'affirmer que la naissance de cette première cellule a eu lieu dans telles ou telles circonstances, même si on découvre des conditions telles qu'il s'en produise de semblables. Ainsi, la manière dont s'est établi cet ensemble de fonctions accordées les unes avec les autres nous échappe, et nous ne pouvons même préciser si elles ont apparu un jour ensemble (hypothèse peu vraisemblable) ou si elles représentent des acquisitions successives, faute de pouvoir indiquer quels sont les éléments essentiels et indispensables de cet accord, ou, si l'on veut, faute de savoir dans quelles conditions il s'est manifesté pour la première fois.

Il y a cependant à ce sujet une remarque assez

curieuse à faire. La première cellule a dû se former en milieu purement minéral, par quelque combinaison imprévue et illogique, née de circonstances fortuites. Ses fonctions ont dû être confiées au début principalement aux corps minéraux les plus communs, et il est probable que nous retrouvons une trace de cette origine dans le fait que certains éléments minéraux sont indispensables à l'exercice de beaucoup de fonctions vitales. On connaît un grand nombre de cas dans lesquels une diastase a besoin, pour agir, du concours d'un de ces éléments ; par exemple, les diastases oxydantes ne peuvent se passer de fer ou de manganèse ; la trypsine pancréatique, comme aussi les diastases coagulantes du lait ou du sang de calcium : le chlorure de sodium rend actifs le suc intestinal et le suc pancréatique, etc... Le fait que le corps de tous les végétaux et de tous les animaux contient une proportion considérable de sels minéraux, alors que leur nutrition et leur respiration n'exigent que la présence de matières hydro-carbonées, semble indiquer la généralité de ces relations et concorde, dans ce cas, avec quelques-unes des idées que les chimistes se sont faites touchant le mode d'action des diastases.

Peut-être pouvons-nous soulever ainsi un coin du voile qui cache l'évolution des êtres. L'un des côtés de cette évolution consisterait dans l'élimination progressive des matières minérales, et cette élimination serait rendue possible par une adaptation de plus en plus parfaite des diastases au but qu'elles ont à atteindre. Nous avons

vu, en effet, que l'un des caractères fondamentaux de ces diastases est leur extrême activité sous un poids donné : la *sucrase*, par exemple, transforme son poids de sucre en moins de trois secondes. Dans tous les cas où le principe actif d'une diastase est une matière minérale, comme celle-ci ne forme qu'une faible partie du poids total, son activité est encore de beaucoup supérieure. Ainsi dans la laccase, diastase oxydante, le principe actif est un métal, le manganèse, et n'importe quel sel de manganèse peut exercer la même action oxydante que la laccase : mais le même poids de manganèse est cent ou deux cents fois plus actif lorsqu'il est à l'état de laccase naturelle que lorsqu'il fait partie d'un sel purement minéral comme le sulfate ou le nitrate. Les diastases à élément minéral sont donc des combinaisons qui élèvent beaucoup l'activité de cet élément. Un être vivant nous paraissant d'autant plus parfait qu'il a plus de fonctions adaptées à son genre de vie, il est évident qu'une condition absolue de cette perfection est qu'il renferme des diastases fonctionnelles très actives par rapport à leur poids, de façon que ces diastases et par suite les fonctions puissent être en très grand nombre. Une combinaison dans laquelle l'activité d'un élément minéral est très élevée est donc, à ce point de vue, une combinaison plus parfaite et plus *évoluée* qu'une autre d'activité moindre; et, par suite, l'évolution doit se traduire par une adaptation de plus en plus parfaite des diastases à leur but, c'est-à-dire par une variation chimique telle que la puissance de

leurs éléments minéraux devienne de plus en plus grande.

Ceci est tout à fait d'accord avec les idées que nous pouvons nous faire sur la naissance de la première cellule : ses premières diastases ont dû être des composés minéraux assez simples, puisqu'il n'y avait rien d'autre alors, et son activité devait être extrêmement réduite en raison de la faible puissance de ces éléments minéraux sous une forme presque brute ; c'est à la suite d'un très long travail de perfectionnement qu'elle est devenue la cellule actuelle, en accroissant le nombre de ses fonctions et en confiant chacune d'elles à quelques combinaisons devenues tout à fait spécifiques.

Ce travail de perfectionnement étant abandonné au hasard, a dû être extrêmement lent, et cette lenteur est assez décourageante si l'on pense que, pour former des êtres artificiels semblables à ceux que nous observons, il faudrait théoriquement, d'après les propriétés des micelles, repasser par tous les états antérieurs et faire durer l'expérience un temps égal à celui qui s'est écoulé depuis l'origine de la vie jusqu'à ce jour. Mais, d'un autre côté, le fait que le hasard seul a pu les produire est de nature à nous inspirer confiance pour le jour où la question de la génération spontanée, un moment résolue par les travaux de Pasteur, se posera de nouveau.

Cette question, en effet, n'est pas définitivement résolue. Pasteur a montré qu'il n'y avait pas, en pratique, de génération spontanée (et je

ne voudrais nullement paraître diminuer l'importance de cette découverte, la plus belle sans doute du siècle dernier, mais il n'a pas du tout montré qu'elle fût impossible. Dans les conditions où il s'est placé, il eût été véritablement extraordinaire, d'après nos idées actuelles, qu'un être quelconque se formât. En effet, sa méthode consistait à stériliser un liquide nutritif, c'est-à-dire à le débarrasser de tout germe vivant, et à l'abandonner ainsi à lui-même, c'est-à-dire, somme toute, à s'en remettre presque entièrement au hasard du soin de former de nouveaux germes. De plus, il ne pouvait s'apercevoir de la formation de ces germes que s'ils avaient eu le pouvoir de se multiplier, car un seul aurait passé inaperçu ; de telle sorte qu'il aurait fallu non seulement que ces germes naquissent, mais encore qu'ils eussent dès le début toutes les propriétés essentielles des organismes naturels, y compris les plus complexes, celles qui dépendent à la fois de la nature chimique des tissus vivants et de leur structure la plus fine. Il est vrai que Pasteur augmentait les chances de survie des cellules qui auraient pu se produire, en leur offrant un milieu propre à leur développement : mais quand on réfléchit à toutes les conditions qu'elles auraient dû remplir pour que l'expérience réussît, on trouve absolument incroyable que le hasard seul, même un peu aidé, ait pu y conduire sur un petit nombre d'expériences d'une durée très limitée, alors que la nature, malgré toutes les ressources dont elle dispose, n'a pu y arriver probablement qu'après des milliers d'années.

La supposition que des êtres pourront du premier coup se révéler avec des propriétés aussi parfaites est réellement insensée, et n'a pu être faite qu'à un moment où le fonctionnement chimique des organismes était encore beaucoup plus mal connu qu'il ne l'est aujourd'hui. Lorsque la question de la génération spontanée reviendra en discussion, c'est en aidant la nature que nous pourrons peut-être obtenir un résultat positif. S'en remettre au hasard, c'est supposer que les pierres lancées par un volcan vont, en retombant, bâtir une cathédrale avec une ville autour. Quoique ce phénomène ne soit pas impossible, il y a bien peu de chances pour qu'il se produise, et si on veut se loger, il faut aider la nature en dirigeant ses forces et en formant les assemblages nécessaires à la construction. De même, pour former une cellule il faudra former beaucoup d'assemblages, dont il serait trop long d'attendre la production spontanée.

Quels seront ces assemblages, dans quel ordre devront-ils être superposés, et dans quelles conditions faudra-t-il les placer ? C'est à la chimie de le montrer, en prenant un à un les mécanismes de la vie et en les démontant jusqu'aux atomes, pour en connaître tous les secrets : puis en essayant de les remonter un à un d'après ce que le premier travail aura appris. Une fois ceci achevé, il faudra réunir toutes les conditions les plus favorables à la production simultanée des différentes substances et des différentes fonctions, et voir ce qui se passe. Peut-être trouvera-t-on alors que le problème se simplifie beaucoup,

que les trois architectures reconnues dans la cellule se déduisent nécessairement l'une de l'autre et que, finalement, la présence d'un certain nombre de fonctions suffit pour que les autres apparaissent d'elles-mêmes. Mais il est plus prudent de ne rien prévoir, et c'est assez de montrer comment, à la lumière des découvertes à faire, le problème sera posé.

Dans un chapitre consacré à la vie et à la mort, une place doit être réservée à cet état intermédiaire qui constitue la maladie. La mort étant le trouble définitif de l'ensemble des fonctions, la maladie en est le trouble temporaire, c'est-à-dire une altération chimique ou physico-chimique de quelques-unes de ces fonctions. C'est à la chimie, par conséquent, qu'il appartient de lutter contre elle. Elle a commencé à le faire, et le nombre des spécifiques chimiques s'accroît de jour en jour : malheureusement elle ne l'a fait qu'à l'aveuglette et en s'en remettant au hasard. Si la médecine prétend devenir une science, il est clair qu'avant de guérir un trouble elle doit se préoccuper d'abord d'en reconnaître la nature. Elle doit donc connaître le fonctionnement de tous les organes, c'est-à-dire principalement les diastases qu'ils sécrètent, les équilibres qui s'y maintiennent, et le pourquoi de tout ce qui s'y passe ; toute cette étude est grandement facilitée par le fait que la plupart de ces fonctions subsistent après la mort dans l'organe détaché du corps, ce qui permet un premier isolement de ces fonctions en groupes indépendants les uns

des autres. Chaque perturbation pouvant alors être définie et mesurée par la disparition et le ralentissement, ou au contraire par une accélération anormale de quelques-unes de ces fonctions, il sera relativement aisé d'y porter remède.

Pour montrer que tout ceci est possible, je citerai un cas où les physiologistes l'ont déjà à moitié fait. La digestion stomacale exige la présence d'une diastase, la pepsine, et d'une certaine quantité d'acide chlorhydrique libre, comme on peut s'en assurer par une expérience purement chimique faite *in vitro* ; en l'absence d'acide, la pepsine est inactive. Les dyspepsies étant causées par une mauvaise digestion stomacale, il était naturel de se demander si ces mauvaises digestions n'étaient pas dues à une insuffisance d'acide (hypochlorhydrie) ; et, cette insuffisance une fois reconnue, il était plus naturel encore de chercher à y remédier par une augmentation artificielle de cet acide, c'est-à-dire par l'ingestion, à chaque repas, de quelques gouttes d'acide chlorhydrique. Voici un exemple très net de la méthode qu'il serait désirable de suivre dans tous les cas : avec cette réserve qu'ici on a abouti à un palliatif, plutôt qu'à un remède, la guérison véritable ne pouvant être obtenue que si l'on a restitué à la muqueuse stomacale le pouvoir de sécréter l'acide chlorhydrique en quantité suffisante.

Toutes les fonctions peuvent être soumises au même examen que la digestion par le suc gastrique, et, à toute perturbation, la chimie est en mesure d'appliquer son remède spécifique dès le

moment où cet examen est terminé. Il doit être fondé sur l'étude des diastases, des catalyses ou des équilibres chimiques dont nous avons reconnu l'importance dans les chapitres précédents ; en particulier, il doit être fondé sur l'étude des substances colloïdales qui forment la majeure partie de nos tissus. Cette étude est commencée de divers côtés, mais, malheureusement, par des moyens empiriques qui laissent quelque doute sur l'interprétation qu'on a donnée des résultats. On a voulu aller trop vite et obtenir des conclusions applicables à la physiologie et à la médecine, avant de connaître la nature exacte des colloïdes : c'était une mauvaise méthode de travail, et ainsi s'explique que le nom de *colloïdes* soit considéré par beaucoup comme uniquement destiné à lancer des produits pharmaceutiques nouveaux. Cette étude doit être reprise presque depuis le début, avec l'aide constante de la physico-chimie qui paraît seule capable d'en assurer le succès.

APPENDICES

I. — Théories de l'action des diastases

Deux théories principales ont été proposées au sujet de la nature des diastases : celle des *diastases-substances* et celle des *diastases-propriétés*. La première se comprend d'elle-même : elle admet l'existence, pour chaque fonction diastasique, d'une substance déterminée, définie, comme le sucre ou l'amidon, qui est la diastase. Cette substance peut être manipulée comme un composé ordinaire, et, partout où elle existe, se manifeste la propriété diastasique qui correspond à sa nature.

La *diastase-propriété* est un peu plus difficile à comprendre. Dans cette conception, défendue notamment par M. Arthus, il n'y a pas de substance qui puisse être appelée diastase : il y a seulement une propriété, qui est fixée sur une certaine matière, mais qui peut en être séparée ; cette propriété n'est caractéristique d'aucune substance particulière, mais peut coexister avec l'une ou avec l'autre, comme aussi les substances avec lesquelles elle se manifeste en général peuvent exister sans elle.

Admettons que nous nous trouvions en présence de plusieurs mélanges complexes, de sucs cellulaires, par exemple, ou d'extraits quelconques, exerçant tous la même action diastasique, comme des *sucrases* de diverses origines, toutes capables d'intervertir le sucre. Si nous admettons que la sucrase est un composé déterminé, nous devons chercher dans tous ces extraits une substance commune : pour cela, nous emploierons une méthode de séparation purement chimique, la précipitation par l'alcool, par exemple. Au contraire, si la diastase est une propriété, nous devrons rechercher dans nos produits complexes une propriété commune, et nos méthodes d'investigation devront être physiques ou physico-chimiques. De plus, dans le premier cas, les réactifs que nous devrons employer pour modifier l'action diastasique devront être des réactifs chimiques (oxydants ou réducteurs, hydratants ou déshydratants, etc.), tandis que, dans le second, ils devront être tels qu'ils modifient surtout l'état physique des mélanges étudiés (congélation, ébullition, courant électrique, etc.). La distinction entre les deux conceptions est donc, comme on le voit, assez profonde ; ce n'est pas du tout une simple querelle de mots.

Sans nous prononcer encore au sujet de cette propriété particulière, qui peut très bien pour le moment rester indéterminée, nous pouvons vérifier qu'il existe un grand nombre de cas où une réaction est commandée par l'état physique, beaucoup plus que par la nature chimique des corps présents. Ainsi, une cartouche de dyna-

mite peut être placée dans le mercure, ou dans l'azote, ou dans l'oxyde de carbone, sans qu'aucun de ces corps, pris ensemble ou séparément, en détermine l'explosion. Mais, si nous plaçons en son milieu une capsule de fulminate de mercure, et si nous enflammons cette capsule, sa déflagration entraînera l'explosion de toute la masse de dynamite. En brûlant, le fulminate n'a cependant donné que du mercure, de l'oxyde de carbone et de l'azote, mais il les a donnés animés d'une vitesse énorme, et c'est cette vitesse qui est ici la cause du phénomène observé, et non la substance ; car, tout objet animé d'une vitesse suffisante, et notamment une balle de plomb, arrivant sur la cartouche de dynamite, la fera exploser tout aussi bien, ce qu'une balle de plomb immobile ne pourra faire. De même, l'eau versée sur un bûcher, ou même un jet de vapeur, ne l'allumera pas ; portons cette vapeur à une température très élevée — nous la prendrons, pour cela, dans une flamme d'hydrogène — et le bûcher s'allumera très rapidement. Dans ce cas, c'est encore, évidemment, la température, propriété physique, qui a agi, et non la substance.

Ces exemples suffisent à faire voir qu'une propriété physique, pouvant appartenir à une foule de corps, peut être la cause déterminante d'un phénomène chimique. On pourrait dire que ces exemples ne prouvent rien, et qu'il n'y a aucune analogie entre un phénomène diastasique et une explosion ou un incendie. En réalité, la différence est beaucoup moins grande qu'on ne pourrait le croire. Comme les actions de diastases,

celles dont je viens de donner l'exemple ont en effet ce caractère, qu'une petite cause y produit un très grand effet. Une allumette peut enflammer un bûcher, et un gramme de fulminate peut faire détoner une tonne de dynamite ; c'est la même disproportion que nous avions constatée entre le poids de diastase et le poids de matière transformée. Ici, cette disproportion tient évidemment à ce que les transformations, une fois mises en route, se continuent d'elles-mêmes. Le bûcher continue à brûler, parce qu'en brûlant il dégage de la chaleur ; s'il en absorbait, au contraire, il s'éteindrait immédiatement après l'allumette. La dynamite continue à faire explosion, parce que les parties qui ont pris feu fournissent des gaz sous une pression et à une vitesse énormes, suffisantes pour propager le phénomène de proche en proche. Ainsi, dans les deux cas, la réaction se poursuit d'elle-même, parce qu'elle dégage de l'énergie, et c'est aussi pour cette raison qu'il suffit d'une cause minime pour la mettre en marche.

Or, dans les transformations diastasiques, il y a aussi un dégagement d'énergie, qui se traduit par une élévation de température. L'inversion du sucre, ou la saccharification de l'amidon, dégagent une quantité appréciable de chaleur, et l'oxydation de l'hydroquinone ou du pyrogallol par la laccase, une quantité assez considérable. D'une façon générale, les réactions chimiques ordinaires qui dégagent de la chaleur (réactions *exothermiques*) ont une tendance à se produire toutes seules : quelquefois, elles s'effectuent

spontanément, même à basse température (union du fluor et de l'hydrogène) ; quelquefois il faut, pour qu'elles se fassent, une sorte d'ébranlement (union du chlore et de l'hydrogène, illuminés par un rayon solaire) et nous voyons qu'il faut, dans ce cas, vaincre une sorte d'inertie des atomes ; quelquefois aussi, elles ne se font qu'à une température plus élevée (combustion du charbon) comme si cette inertie était beaucoup plus grande. Il n'y a pas de raison pour que la même règle ne s'applique pas aux actions diastasiques ; elles auront, elles aussi, une tendance à se produire toutes seules, et en seront empêchées par une sorte d'inertie des atomes, ou, si l'on veut, par la stabilité des molécules. La diastase ne fera que vaincre cette inertie, comme le fulminate et l'allumette.

Le rôle qu'elles ont ainsi à jouer établit entre toutes les diastases une parenté évidente, et nous encourage à chercher une explication, plutôt du côté *propriété* que du côté *substances*, puisque nous définissons, somme toute, une diastase comme la *propriété* d'accélérer une réaction. A quel état physique correspond cette propriété ? Rien ne nous autorise actuellement à l'attribuer à l'un plutôt qu'à l'autre, et nous ne pourrons le faire que lorsque nous aurons sur les diastases des connaissances beaucoup plus précises. Tout au plus, peut-on donner quelques indications générales.

Il n'est pas nécessaire d'aller bien loin dans l'étude de la chimie pour rencontrer des réactions

produites par les éléments ou les radicaux *à l'état naissant*. Les réductions par l'hydrogène naissant, en particulier, sont très nombreuses et très souvent utilisées. Produit par un courant électrique à l'électrode négative, ou par la dissolution du zinc dans l'acide chlorhydrique, il peut réduire l'acide nitrique à l'état d'ammoniaque, ou les sels chromiques à l'état de sels chromeux, tandis que l'hydrogène gazeux, à l'état où nous le connaissons d'ordinaire, ne donne à la même température aucune trace de ces réactions. De même, l'oxygène naissant oxyde l'eau à l'état d'eau oxygénée, l'acide sulfurique à l'état d'acide persulfurique, etc..., tandis que l'oxygène libre en est incapable. Le chlore gazeux et froid n'agit pas sur le platine ; le chlore naissant le dissout. L'iode naissant transforme l'ammoniaque, même extrêmement étendue, en iodure d'azote : la réaction n'est possible, avec l'iode solide, que si l'ammoniaque est au contraire très concentrée. Le méthane et la benzine ne réagissent pas l'un sur l'autre, même au rouge, ou presque pas : en les prenant tous deux à l'état naissant (par la calcination d'un mélange de benzoate et d'acétate de chaux), ils s'unissent pour former le toluène. On pourrait donner bien d'autres exemples de ces affinités spéciales des corps à l'état naissant ; nous les résumerons tous en disant que les éléments ou les radicaux, à l'état naissant, sont dépourvus d'inertie ; ils se comportent comme si toutes leurs affinités étaient libres, et obéissent immédiatement à leurs tendances.

Lorsqu'on électrolyse de l'eau acidulée, les atomes d'hydrogène contenus dans le liquide et chargés d'électricité (les *ions* hydrogène) se dirigent vers l'électrode négative ; là, ils perdent leur charge et se combinent deux à deux pour former des molécules qui se dégagent[1]. Si, au lieu de résulter d'une électrolyse, l'hydrogène est produit, comme il l'est souvent dans les laboratoires, par la réaction du zinc sur l'acide chlorhydrique, le phénomène est encore de la même nature ; ce sont toujours des atomes chargés d'électricité, des ions hydrogène, qui se réunissent en perdant leur charge pour former des molécules neutres. Comme, dans cet état naissant, d'origine chimique, ils possèdent les mêmes propriétés que dans l'état naissant d'origine électrique, il est bien évident que la propriété de l'*état naissant* est liée à l'état atomique et nullement au procédé par lequel cet état atomique est réalisé. Comme d'autre part les ions, ou atomes chargés, existent dans toute la masse du liquide soumis à l'électrolyse, tandis que les propriétés spéciales n'apparaissent qu'aux électrodes, nous sommes obligés de compléter notre hypothèse et d'admettre que ces propriétés ne se manifestent qu'au moment où les ions se recombinent pour former des molécules neutres.

Tout ceci semble nous éloigner beaucoup des diastases ; en réalité nous en sommes tout près, et j'espère pouvoir le montrer en analysant le

1. Sous la forme de gaz ; on sait, en effet, que les gaz sont formés, à l'exception de quelques-uns, par des molécules composées de plusieurs atomes, et presque toujours de deux.

mode d'action de la mieux connue des diastases, la *laccase*, ou diastase oxydante de l'arbre à laque, dont il a déjà été question dans ce chapitre. La laccase est une matière assez complexe, composée principalement de gomme arabique, et d'une faible quantité de matière azotée, probablement albuminoïde. De plus, elle contient une assez forte proportion de manganèse, variable d'un échantillon à l'autre, et pouvant aller jusqu'à 0,16 p. 100, ce qui est considérable, car la très grande majorité des végétaux ne contiennent que des quantités de manganèse beaucoup plus petites. Or, c'est ce manganèse qui est le principe actif ; en effet, G. Bertrand a montré que l'action oxydante d'une laccase était proportionnelle à sa teneur en manganèse. Voici quelques-uns de ses résultats ; l'action oxydante est mesurée par le nombre de centimètres cubes d'oxygène absorbé dans les mêmes conditions et pendant le même temps :

Teneur en Mn. .	0,16 p. 100.	Action oxydante.	19,1
— . .	0,13 —	— .	15.5
— . .	0,10 —	— .	10.6

La matière organique, qui accompagne ce manganèse, semble n'en être que le support. Elle n'est pas indispensable, et G. Bertrand a montré qu'un sel quelconque de manganèse pouvait, comme la laccase, oxyder l'hydroquinone. Seulement, l'action oxydante, pour un même poids de manganèse, est extrêmement variable d'un sel à l'autre (15 fois plus grande, par exemple, avec le succinate qu'avec le nitrate) et tou-

jours beaucoup plus faible que dans la laccase[1].

Que conclure de ces faits? Nous ne pouvons pas dire que la diastase est le manganèse, car la même quantité de ce métal est 50.000 fois plus active dans la laccase que dans le nitrate, et serait probablement nulle pour le manganèse métallique Ce n'est pas non plus un sel *déterminé* de manganèse, puisque tous ont une action semblable. Mais ce peut très bien être un *état physique* du manganèse, état variable d'un sel à l'autre, et réalisé avec beaucoup plus de perfection dans la laccase, à laquelle son origine végétale peut communiquer un *état organisé* bien différent de celui des sels cristallisés.

Ici, nous sommes au bout des résultats acquis par l'expérience, et nous ne pouvons pas aller plus loin sans hypothèses. Comparons l'oxydation de l'hydroquinone par la laccase à son oxydation par l'oxygène naissant (réalisable vraisemblablement par l'électrolyse, car celle du pyrogallol l'est et donne la purpurogalline qui résulte aussi de l'oxydation diastasique); nous réduirons les deux phénomènes à un seul si nous admettons que la laccase se comporte comme une source d'oxygène naissant. Dans quel état devra être le manganèse pour se comporter ainsi? Deux hypothèses ont été émises, et, quoiqu'opposées l'une à l'autre, elles ont ceci de commun qu'elles n'attribuent un rôle actif qu'à une partie du manganèse.

1. D'après M. Dony Hénault, la réaction du milieu serait un facteur extrêmement important de ces réactions oxydasiques. Le fait est pour nous ici sans grande importance, car il ne peut être question de nier le rôle du manganèse.

D'après la première, la fraction active du sel de manganèse serait la partie hydrolysée : ce serait le manganèse à l'état d'oxyde manganeux MnO, capable de se suroxyder à l'air en donnant le bioxyde MnO^2 qui, lui-même, cèderait de l'oxygène à l'hydroquinone. La réaction se ferait en deux phases :

$$MnO + O = MnO^2$$
$$MnO^2 + C^6H^4(OH)^2 = MnO + C^6H^4O^2 + H^2O$$

le protoxyde de manganèse ainsi reconstitué recommençant immédiatement à fixer l'oxygène et parcourant indéfiniment le même cycle, ce qui permet à une quantité *limitée* de cet oxyde de fixer sur l'hydroquinone, si on lui en laisse le temps, des quantités *illimitées* d'oxygène, conformément à cette propriété générale des diastases d'agir sur un poids de matière très supérieur au leur.

D'après la seconde hypothèse, la partie active serait au contraire l'ion Mn, c'est-à-dire la partie du sel qui *n'est pas* hydrolysée. Cet ion Mn peut exister dans le liquide sous deux états, différant par la charge électrique qu'ils portent. L'un (Mn_{++}) porte deux charges positives : l'autre (Mn_{+++}) en porte trois. Dans une première phase, le premier se transformera dans le second en absorbant la charge d'un ion hydrogène (H_+) et deux ions hydrogène ainsi déchargés, *à l'état naissant*, s'uniront à l'oxygène dissous dans le liquide pour former de l'eau :

$$2\,Mn_{++} + 2\,H_+ + O = 2\,Mn_{+++} + H^2O.$$

Dans une seconde phase, l'ion Mn_{+++} à trois charges se transformerait en ion à deux charges en décomposant une molécule d'eau, dont l'oxygène *naissant* se fixerait sur l'hydroquinone ou plus généralement sur le corps oxydable R pour donner l'oxyde RO.

$$2Mn_{+++} + H^2O + R = 2Mn_{++} + 2H_+ + RO\ (^1)$$

et le même cycle d'opérations recommencerait indéfiniment.

Ce n'est pas ici le lieu de discuter ces deux conceptions : la première est plus généralement adoptée, mais la seconde met mieux en relief les analogies des actions de diastases avec celles qui sont dues à l'état naissant. L'important pour nous est qu'elles donnent une interprétation de la nature des *diastases propriétés*. En adoptant l'une ou l'autre, la laccase deviendra la coexistence du manganèse avec un état physique particulier (état hydrolysé, ou état d'ion) et peut-être avec la réaction alcaline du liquide ; et cette conception pourra être immédiatement généralisée. Le manganèse, en effet, n'y est pas indispensable, et le cérium et le lanthane, d'après A. Job, comme aussi dans certains cas le fer, d'après Wolff, peuvent le remplacer. Il en est probablement de même de tous les métaux qui peuvent

1. On suivrait le phénomène de plus près en dédoublant la seconde phase :

$$2Mn_{+++} + 2OH_- + 2H_+ = 2Mn_{++} + 2OH + 2H_+$$
$$2OH + R = RO + H^2O.$$

Il n'y a pas, en effet, à proprement parler, d'oxygène naissant, mais de l'*oxhydrile* naissant.

donner des sels solubles, à deux degrés différents d'oxydation, et facilement transformables les uns dans les autres. S'il en était ainsi, une oxydase ayant les propriétés de la laccase pourrait simplement être définie *un ion à deux valences différentes*. Une telle définition serait le triomphe de la doctrine des diastases propriétés.

Mais nous ne devons pas oublier qu'il s'agit ici d'hypothèses. Cette doctrine n'a de sens que si l'on sait de quelle propriété on veut parler, et ne correspond autrement à rien de précis. Quoique certains physiciens, farouches *énergétistes*, veuillent supprimer l'idée de matière, il se passera sans doute bien des années avant qu'ils aient converti les chimistes à leur manière de voir; et que ceux-ci cessent d'envisager les propriétés comme nécessairement supportées par une substance dont elles sont plus ou moins dépendantes. Vouloir qu'une oxydase soit une propriété pure, ce serait lui accorder une âme : et un esprit positif n'admettra pas volontiers que l'*âme des choses* soit plus qu'une poétique absurdité, et qu'il faille accorder une âme à la pepsine ou à la laccase.

II. — Les micelles et l'ultramicroscope

J'ai dit que les micelles, qui forment l'élément constitutif des substances organisées et des colloïdes, sont trop petites pour qu'on puisse les apercevoir au microscope ordinaire. En effet, même avec les plus forts grossissements qu'on sache obtenir à l'heure actuelle (et ces grossisse-

ments approchent de 3.000 fois en diamètre) on ne peut pas distinguer des objets dont le diamètre est inférieur à 0,1 μ environ (la lettre μ désignant comme on sait, le millième de millimètre). Or, les micelles sont, en général, bien au dessous de cette limite, bien qu'ils puissent en exister aussi de notablement plus grosses. Les plus fines semblent avoir des dimensions voisines de 0,001 μ : celles de 0,01 μ sont déjà considérées comme assez grosses. et cependant elles sont bien au dessous de ce qui est perceptible.

Pour parvenir à les distinguer, il faut user d'un artifice dont on doit l'invention à deux savants allemands, Siedentopf et Zsigmondy. Il consiste à éclairer latéralement l'objet qu'on veut apercevoir, au lieu de l'éclairer par derrière. Dans le microscope ordinaire, la lumière du ciel ou d'une lampe est reçue sur un condenseur qui la fait converger sur la préparation qu'elle traverse : plus loin, elle est reçue sur l'objectif qui la renvoie dans l'oculaire et finalement dans l'œil. Un objet très petit, une tache noire par exemple, située dans la préparation, intercepte certains de ces rayons et c'est pour cela qu'elle est vue. Si cette tache est suffisamment large, un de ces points donne une image distincte et nous en percevons la forme. Si, au contraire, elle est très étroite, par suite de propriétés de la lumière sur lesquelles je n'ai pas à insister ici (diffraction) les images de tous les points enpiètent les unes sur les autres et cette tache nous paraît circulaire, quelle qu'en soit la forme réelle.

Si petite qu'elle soit, elle intercepte toujours

des rayons, et, par suite, elle donne toujours une image; seulement, d'après un calcul de Lord Rayleigh, la quantité de lumière interceptée varie comme la sixième puissance de la dimension de l'objet. Une tache deux fois plus petite qu'une autre n'arrêtera par suite qu'une quantité de lumière 64 fois plus faible : une tache dix fois plus petite, une quantité de lumière un million de fois plus faible. Dans les observations au microscope, le fond de la préparation est toujours très lumineux, puisque l'œil reçoit tous les rayons tombés sur le condenseur. Si, dans ces conditions, un objet de 0,1 μ de diamètre est à peine visible, un objet de 0,05 μ et a fortiori de 0,01 μ seront totalement invisibles, l'œil ébloui par l'éclairement général ne pouvant discerner la disparition d'un nombre infime de rayons.

Ces quelques rayons interceptés par une très fine particule ne sont pas perdus : la particule les diffracte, c'est-à-dire les renvoie dans toutes les direction comme si elle était lumineuse elle-même. C'est cette propriété qui est mise à profit dans l'*ultramicroscope*. La préparation n'est plus éclairée dans le sens de l'axe du microscope, mais *latéralement*, perpendiculairement à cet axe, en plaçant le condenseur dans une position convenable. De cette manière, les rayons lumineux qui ne rencontrent pas de particule poursuivent leur route perpendiculairement à l'axe et n'arrivent pas à l'œil. Au contraire, parmi ceux qui rencontrent une particule et sont renvoyés dans toutes les directions, un grand nombre parviennent à l'objectif (qui est disposé à la manière

ordinaire) et de là à l'œil qui les perçoit. Chacune de ces particules donne ainsi une tache lumineuse sur un fond noir. On peut faire varier l'éclairement à son gré, employer l'arc électrique ou même le soleil : l'œil n'est jamais ébloui puisqu'il ne reçoit que la lumière renvoyée par les particules.

L'ultramicroscope[1] est ainsi nommé parce que sa sensibilité dépasse de beaucoup celle du microscope. Cette sensibilité varie avec l'intensité de la lumière employée : d'ordinaire, avec la lumière d'une lampe à arc, on aperçoit sans difficulté des particules de 0,01 μ de diamètre. En employant la lumière solaire d'un jour d'été, on peut descendre jusqu'à 0,003 μ, c'est-à-dire presque jusqu'aux plus fines micelles. L'existence de celles-ci a donc pu être prouvée dans un très grand nombre de cas[2].

Dans d'autres cas on a été conduit à supposer la structure micellaire, sans cependant avoir vu les micelles : c'est ainsi qu'on n'aperçoit rien dans certaines solutions d'albumine ou de gélatine ; on y admet alors l'existence des micelles pour ainsi dire par continuité, parce qu'on ne trouve pas

1. La théorie, la description et l'usage de cet instrument sont exposés dans le livre de MM. Cotton et Mouton, *Les Ultramicroscopes*, Paris, 1906, Masson.

2. Les molécules ordinaires ayant un diamètre de 0,0001 à 0,0005 μ, on voit que pour les apercevoir par ce procédé (ce qui n'est pas impossible théoriquement) il faudrait disposer d'une lumière au moins 40.000 fois plus forte que celle du soleil. Or, les autres sources lumineuses dont nous disposons (notamment l'arc électrique) ont un éclat beaucoup plus faible que celui du soleil : il n'y a donc pas grand espoir de voir les molécules de cette manière.

de grandes différences de propriétés entre ces solutions *non résolubles* et d'autres *résolubles*, tandis qu'on en trouve entre ces solutions non résolubles et des solutions ordinaires. On se dit que des particules de 0,001 μ ou 0,002 μ de diamètre seraient certainement des micelles et non des molécules, car celles-ci sont plus petites encore : que, d'autre part, l'ultramicroscope ne permettrait pas de les voir, même avec la lumière la plus intense : et qu'on est par suite autorisé à en supposer l'existence, si cette supposition est justifiée d'autre part par d'indiscutables analogies.

Lorsque les micelles sont suffisamment visibles pour pouvoir être comptées, on détermine leur diamètre en mesurant leur nombre dans un volume donné de liquide, et leur poids total dans le même volume. Le quotient des deux nombres donne directement le poids de chacune, et le quotient par la densité donne le volume, dont on déduit le diamètre en les supposant sphériques. Lorsque les micelles sont invisibles, même à l'ultramicroscope, on peut quelquefois arriver à mesurer leur dimension par d'autres procédés : on a trouvé, par exemple, que celles de la gomme arabique avaient un diamètre de 0,003 μ. En raison de cette ténuité, leur nombre par unité de volume est extrêmement grand : pour une solution de gomme à 3 p. 100, il est, par exemple, de 10^{18} environ ou un milliard de milliards : dans un cube de un millième de millimètre de côté, il y a encore *un million* de micelles. Les molécules sont, comme on sait, encore beaucoup

plus petites et plus nombreuses : le même volume d'eau en contient en effet $4{,}10^{10}$ ou 40.000 fois plus que de micelles.

III. — L'étude des substances organisées

Les propriétés des colloïdes, spécialement adaptés, comme nous l'avons vu, au rôle qu'ils jouent, à l'état de matière organisée, dans la cellule vivante, ne sont pas favorables à leur étude et ont obligé les chimistes à imaginer de nouvelles méthodes, celles qu'ils emploient d'habitude à la connaissance des composés minéraux ou organiques ne pouvant plus leur servir dans ce nouveau cas. La présence de ces colloïdes complique, en effet, à un degré extrême l'étude chimique des substances vivantes ou ayant vécu, et ceci pour plusieurs raisons.

La première est que nous n'avons aucun moyen d'identifier un colloïde. En chimie minérale, en chimie organique même, les corps peuvent être exactement définis : leur composition parfaitement constante, leurs réactions, ou même de simples constantes physiques telles que leur poids moléculaire, leur forme cristalline, leur point de fusion ou d'ébullition, leur solubilité dans différents milieux, suffisent à les reconnaître. L'eau fond à 0°, bout à 100°, et a un poids moléculaire de 18 : si une réaction conduit à un corps fondant à 0°, bouillant à 100° et ayant un poids moléculaire de 18, c'est de l'eau : la probabilité pour que ce n'en soit pas est pratiquement nulle, et il est inutile de chercher à la

caractériser autrement. Si cependant on voulait le faire, il n'y aurait aucune difficulté, et la mesure de la densité, ou de l'indice de réfraction, dissiperait toute incertitude. Tous les cas ne sont pas aussi simples que celui de l'eau, mais cependant on peut admettre qu'un corps organique quelconque est suffisamment défini par sa composition centésimale brute, son poids moléculaire et ses points de fusion et d'ébullition : ce n'est que lorsqu'un de ces points vient à manquer qu'on emploie un autre procédé d'identification.

A ce point de vue, les colloïdes se présentent d'une tout autre manière. Prenons par exemple leur composition chimique. Lorsque je disais que la formule de l'amidon est $C^6H^{10}O^5$, je commettais une erreur volontaire, et la vraie formule est beaucoup moins simple. D'abord, le rapport du carbone à l'hydrogène n'est pas exactement de 6 à 10 : comme tous les colloïdes, l'amidon absorbe énergiquement la vapeur d'eau, et ne l'abandonne complètement ni dans le vide ni dans l'air chaud avant la température à laquelle il se décompose. Il est donc impossible de définir l'amidon sec auquel doivent se rapporter les chiffres d'analyse : ceux-ci correspondent soit à un amidon encore humide, soit à un amidon déjà décomposé, et si dans une expérience on a trouvé exactement le rapport voulu de 6 à 10, c'est que par une heureuse chance on a tenu la balance égale entre l'hydratation et la décomposition. Ensuite, il n'y a pas dans l'amidon que les trois éléments carbone, hydrogène, oxygène :

il y a toujours en même temps du phosphore et de la chaux, et le rapport du phosphore à la chaux n'est pas constant, pas plus que le rapport d'aucun des deux au carbone et à l'hydrogène. Ce phosphore et cette chaux ne peuvent pas être considérés comme des impuretés, car de leur plus ou moins grande abondance dépendent beaucoup de propriétés de l'amidon : de sorte qu'on est obligé de les considérer comme des éléments essentiels et que, finalement, tous les éléments contenus dans l'amidon y sont par rapport les uns aux autres dans des proportions variables.

La formule $C^6H^{10}O^5$ représente donc, non pas l'amidon, mais *un* amidon idéal, inexistant, dont les amidons réels ne doivent pas s'écarter trop. Mais il suffit qu'ils s'en écartent d'une quantité sensible pour que la détermination de leur composition ne nous soit pas d'un grand secours : sachant *a priori* que nous ne devons pas trouver de nombres entiers, mais des fractions qui pourront être interprétées de diverses manières, c'est d'après l'ensemble des autres propriétés du corps analysé que nous choisirons un système de nombres entiers simples pour remplacer les nombres fractionnaires donnés par l'analyse. L'opération analytique n'aura qu'un but, nous montrer qu'il n'est pas absurde d'attribuer au corps étudié la formule $C^6H^{10}O^5$; elle donnera une preuve accessoire et non pas une preuve principale. Elle ne la donnera même que parce que la formule *arrondie* de l'amidon est simple : s'il s'agit de corps plus complexes tels que l'al-

bumine, la gélatine, l'hémoglobine, l'argument tiré de la similitude des compositions chimiques sera tout à fait sans force, et on ne se donnera même pas la peine de déterminer ces compositions, la même pouvant convenir, avec les limites d'élasticité admises, à deux corps différents, et un corps pouvant, suivant le procédé employé pour l'obtenir, présenter plusieurs compositions différentes comprises dans les mêmes limites d'élasticité.

L'inconvénient de cette impossibilité de la détermination chimique, par l'analyse élémentaire, ne serait pas très grand si nous avions au moins, pour caractériser toutes ces substances, des caractères physiques suffisamment précis. Il n'en est rien. Les colloïdes ne sont pas cristallisables : on ne peut donc les reconnaître en se basant sur des formes géométriques. Ils ne sont solubles dans aucun liquide, sauf l'eau et quelquefois la glycérine : et, dans aucun de ces deux liquides, ils n'ont de solubilité définie et constante. Ils ne sont pas volatils : leur densité, leur indice de réfraction, leur pouvoir rotatoire varient avec les circonstances dans lesquelles on les observe. Les méthodes de détermination du poids moléculaire (cryoscopie, ébullioscopie) ne leur sont pas applicables. Ainsi, aucun caractère physique usité dans le cas des cristalloïdes ne peut servir à les identifier.

Il en résulte qu'on ne sait jamais si le même nom ne couvre pas des espèces chimiques différentes, ayant simplement en commun la propriété qui les fait grouper sous ce nom. On ne sait pas

non plus si une même espèce n'est pas désignée sous plusieurs noms, et si ce n'est pas une impureté, variable selon l'origine, qui en a fait distinguer plusieurs variétés. Ainsi, il n'y a aucune preuve que la sucrase extraite de la levure soit identique à la sucrase extraite de l'*Aspergillus :* il n'y a pas davantage de preuve que beaucoup d'albuminoïdes, que l'on a voulu séparer les uns des autres, ne soient pas identiques au fond.

Mais le plus grand inconvénient de cette absence de caractères physiques, de cette *indétermination* des substances organisées, se révèle quand on veut en effectuer la séparation. Un corps existe rarement, ou se forme rarement à l'état pur : il est en général mélangé à d'autres substances dont il faut le séparer pour l'étudier. Pour les corps minéraux ou organiques cristallisables, les procédés de séparation ne manquent pas : l'un des principaux et des meilleurs consiste à traiter le mélange successivement par plusieurs dissolvants, et, si l'on n'a pas la chance d'en trouver un qui dissolve bien l'un des constituants du mélange en respectant les autres, du moins les solubilités seront différentes et permettront d'isoler par cristallisation le produit cherché. Une autre méthode repose sur la volatilité : c'est celle de la *distillation fractionnée*, qui permet d'obtenir séparément les constituants d'un mélange lorsque leur point d'ébullition n'est pas le même, et dont la chimie organique fait un grand usage. Enfin, lorsque ces deux procédés échouent, on a la ressource de trans-

former les corps contenus dans le mélange en dérivés plus faciles à identifier : c'est par ce moyen, en combinant les sucres à la phénylhydrazine, que Emile Fischer est arrivé à débrouiller la question extrêmement complexe de l'isomérie des matières sucrées, qu'aucun autre procédé ne permettait de séparer convenablement les unes des autres.

Il résulte immédiatement de ce qui a été dit plus haut que tous ces moyens de séparation échouent sur les colloïdes. Comme ce sont en même temps des procédés de purification, ils ne peuvent pas non plus être employés à ce second titre et, par suite, les méthodes ordinaires de la chimie ne nous permettent ni de séparer deux colloïdes, ni d'en obtenir un à l'état pur. Or, il n'y a pas de chimie possible sans procédés de séparation. On nous donne un produit naturel, ou bien nous obtenons un produit artificiel, et il faut savoir ce qu'il y a dedans : il n'y a pas d'autre méthode à employer qu'une méthode de séparation. Une fois les différents constituants obtenus et placés chacun dans son flacon, le problème est presque résolu, à moins qu'il ne le soit tout à fait : tant qu'ils restent ensemble, aucune conclusion n'est possible. Prenons un exemple, dans un cas auquel les méthodes nouvelles, que j'exposerai plus loin, n'ont pas été encore appliquées ; celui de la sucrase, que nous ne connaissons qu'à l'état de mélange avec d'autres substances : nous ne savons

ni combien il y en a dans le mélange, dont on ne peut l'extraire pure ;

ni sa composition chimique;
ni aucune de ses propriétés physiques, si mal définies qu'elles soient;
ni si elle est identique à une autre sucrase, ou différente;
ni ce qui la distingue d'une autre matière organique colloïde *quelconque*, en dehors de la propriété d'intervertir le sucre, qui sert à la définir. Autant dire que nous sommes dans une obscurité complète, et que le mot sucrase représente pour nous quelque chose d'aussi net que le *principe du feu* pour les anciens alchimistes. La chimie des matières organisées est, en fait, en retard sur les autres de plus d'un siècle.

Ceci étant bien reconnu, il a fallu trouver des méthodes de séparation appropriées aux colloïdes, et on en a trouvé, mais qui sont loin de présenter la certitude des autres et qui sont, en outre, d'un emploi beaucoup moins facile. Les premières ont été les méthodes de *précipitation*. Une solution d'albumine, ou de gomme, ou d'amidon, est précipitée par l'alcool : d'autres le sont par le sulfate d'ammoniaque ou tout autre sel très soluble pris en quantité suffisante. Comme cette quantité n'est pas la même pour les différents colloïdes, on a pu tirer de là une méthode de séparation employée très souvent, en particulier dans l'étude des matières albuminoïdes. De très nombreux résultats ont été obtenus ainsi, mais ils sont merveilleusement discordants, et leur valeur est des plus contestables, parce qu'il n'y a aucune certitude que l'alcool

ou le sulfate d'ammoniaque ajoutés ainsi en proportions considérables n'agissent pas chimiquement sur les substances qu'il s'agit d'isoler, et n'en modifient pas la nature · de telle sorte que, après qu'on a séparé le mélange en deux fractions, on n'est pas sûr qu'aucune des deux fractions préexistait au traitement, et qu'on n'a pas *créé* des différences au lieu de les constater. De plus, ce procédé de séparation est en lui-même très mauvais, car presque tous les colloïdes, sinon tous, à un degré suffisant de concentration, sont précipités par l'alcool, ainsi d'ailleurs qu'un bon nombre de substances qui ne sont nullement des colloïdes, comme le sel marin par exemple. Cependant, ces dernières sont rarement complètement insolubles dans l'alcool, et le procédé de précipitation est souvent employé pour séparer les colloïdes, tout à fait insolubles au contraire dans l'alcool, des cristalloïdes auxquels ils sont mélangés. Dans ce cas d'ailleurs il est inférieur à tous égards, excepté au point de vue de la rapidité, à la *dialyse* qui ne nécessite aucun réactif, et qui est une opération trop connue pour que j'y insiste.

Une deuxième méthode, beaucoup plus rationnelle, consiste à employer un tamis. Du moment que les molécules des colloïdes, les micelles, sont de grosseur variable, tout en étant beaucoup plus grosses que les molécules ordinaires, il doit être possible de les séparer par tamisage, si l'on dispose d'une paroi percée de trous suffisamment fins. Des pores de la dimension voulue ne sont pas irréalisables ; la plupart des gelées, en parti-

culier celle de gélatine, sont constituées par une sorte de filet excessivement serré, et les mailles du filet ont bien la dimension convenable. Des filtrations sur gélatine ont été faites en effet par Ch. Martin : mais, actuellement, en raison de son peu de solidité, la gélatine a été remplacée presque partout par le collodion. Il est possible, facile même, d'obtenir des membranes de collodion minces et résistantes ; en changeant les proportions d'alcool, d'éther et de coton-poudre, qui sont les trois constituants du collodion, on arrive à faire varier, dans de très notables proportions, la dimension des pores, ou plus exactement des canaux sinueux qui traversent cette membrane, et il semble qu'on puisse obtenir ainsi sans difficulté des trous dont le diamètre varie entre un millionième et un cinquante millième ou un vingt-millième de millimètre (de 0,001 μ à 0,02 μ ou 0,05 μ). Comme on le voit, ces trous sont excessivement petits, dix fois plus petits même que des microbes, qu'ils arrêtent complètement ; aussi sont-ce les bactériologistes qui ont employé, les premiers, les membranes de collodion, beaucoup plus rigoureusement imperméables aux microorganismes que la bougie de porcelaine du filtre Chamberland. Leur application à l'étude des colloïdes est due à G. Malfitano[1]. Ils peuvent servir, soit à la séparation de colloïdes et de cristalloïdes, ces derniers les

1. Les chimistes allemands l'attribuent assez souvent à H. Bechhold ; mais la priorité de Malfitano ne fait pas de doute. Ses expériences ayant été faites en France, il convient qu'ici au moins on lui rende justice.

franchissant sans rencontrer de résistance, soit à la séparation d'un mélange de colloïdes dont les micelles sont de grosseur différente, exactement comme un crible permet de classer des fragments de minerai ou des poudres quelconques d'après leur grosseur. Cette application est de date assez récente, et a déjà fourni un grand nombre de résultats intéressants : mais ceux-ci sont d'ordre trop technique pour pouvoir être résumés ici.

Cette méthode de séparation n'est cependant pas parfaite, et on peut objecter qu'il n'est pas absolument sûr que la membrane de collodion classe les micelles uniquement par ordre de grosseur ; les affinités particulières de la nitrocellulose, dont elle est formée, semblent parfois entrer en jeu. Aussi la troisième, que je vais maintenant décrire, est-elle certainement préférable, mais elle est, dans la science, de date encore plus récente, et n'a encore jamais, à ma connaissance, été appliquée à de véritables colloïdes, bien que les laitiers et les fabricants de fromages l'emploient couramment. Elle consiste à employer, pour effectuer la séparation des micelles de diverses grosseurs, la simple pesanteur.

On sait que, à mesure qu'on s'élève dans l'atmosphère, la pression barométrique diminue ; à 3.300 mètres, elle n'est plus que les $\frac{2}{3}$ de ce qu'elle est au niveau de la mer, et, à 5.500 mètres, elle n'est plus que la moitié ; on a, en dessous de soi, la moitié de l'atmosphère. Si celle-ci était formée d'hydrogène, la hauteur de pression moitié ne serait plus de 5.500 mètres : elle

serait, l'hydrogène étant 14 fois plus léger que l'air, environ 14 fois plus grande, c'est-à-dire de 80 kilomètres. Au contraire, si l'atmosphère était formée de vapeurs d'iode, vapeur 8 fois plus lourde que l'air, la moitié de cette vapeur serait contenue dans une épaisseur de 700 mètres seulement. D'une façon générale, le produit du poids moléculaire par la hauteur de pression moitié est constant, quelle que soit la grosseur de la molécule. Des expériences de M. J. Perrin ont montré que la même propriété se retrouvait dans les solutions colloïdales ; les micelles d'une telle solution se répartissent par couches horizontales, *exactement comme elles le feraient si elles étaient les molécules d'un gaz*, c'est-à-dire avec une densité sans cesse décroissante de bas en haut. Seulement, comme ce sont des molécules extrêmement lourdes, la hauteur à laquelle leur nombre, par unité de volume, se réduit à moitié, est incomparablement plus faible, et, dans certaines expériences de M. Perrin, elle était de moins de $\frac{1}{10}$ de millimètre, ce qui correspond à un poids moléculaire de 1.700.000.000, alors que celui de l'oxygène est 32 et celui de l'iode 254. Les solutions étudiées par M. Perrin sont, à vrai dire, exceptionnelles, et pour tous les colloïdes usuels les nombres sont beaucoup moins forts, étant compris en général entre quelques milliers et quelques millions.

Supposons un mélange de deux colloïdes ayant, l'un un poids moléculaire de 100.000, l'autre un poids moléculaire de 200.000. Pour

le premier, la concentration sera réduite à moitié pour une différence de hauteur de 1 m. 60 environ ; pour le second, le nombre correspondant sera de 80 centimètres. Si nous remplissons de ce mélange un tube de 3 m. 20 de hauteur, et si nous attendons que l'équilibre soit établi, les grosses micelles seront, près du fond, beaucoup plus rassemblées que les petites ; en enlevant la couche supérieure de 80 centimètres d'épaisseur, elle contiendra environ 7 p. 100 des grosses et 14 p. 100 des petites, et, par suite, ces dernières s'y seront notablement concentrées. En répétant plusieurs fois l'expérience, on arriverait à une séparation complète. Assurément, il ne serait pas très facile d'opérer sur des tubes de 3 mètres de long, ni très pratique d'attendre que l'équilibre soit atteint, car il faudrait pour cela plusieurs mois ou plusieurs années ; mais il est possible de supprimer cette difficulté en *augmentant la pesanteur*. En effet, si, sur la terre, il faut monter à 5.500 mètres, pour avoir au-dessous de soi la moitié de l'atmosphère, sur le soleil, où la pesanteur est 27 fois 1/2 plus grande, il suffirait, en admettant que la température soit la même, de monter à 200 mètres. Nous ne pouvons aller expérimenter sur le soleil, mais il est un moyen très simple d'arriver au même résultat : il consiste à employer la force centrifuge. Il suffira d'enfermer le mélange dans un tube et de faire tourner ce tube très rapidement autour d'un axe, d'*écrémer* en quelque sorte le colloïde, car l'écrémage du lait consiste dans la séparation des gros et des petits

globules de beurre, qui, à ce point de vue, se comportent comme des micelles. Il n'y a aucune difficulté à réaliser une force centrifuge qui soit 1.000 fois plus grande que la pesanteur, et à obtenir, par suite, dans un tube de 5 centimètres de longueur, ce qu'on obtiendrait autrement dans un tube de 50 mètres. Cette méthode de séparation et de purification (qui s'applique aussi, mais avec plus de difficultés, aux cristalloïdes) présente sur toutes les autres l'avantage considérable qu'elle ne fait rien intervenir qui puisse influer sur la micelle. Ainsi que je le disais, elle n'a pas été encore systématiquement employée, peut-être parce que certaines difficultés techniques n'ont pas été résolues. Je ne l'ai mentionnée qu'à cause de sa grande importance théorique. Non seulement, en effet, elle permet de séparer les colloïdes, mais elle peut donner le poids moléculaire de chacun d'eux, c'est-à-dire un élément qu'aucune autre méthode ne permet pratiquement d'atteindre, et dont la connaissance est indispensable. Ce poids moléculaire se déduit directement de la hauteur à laquelle la concentration des micelles est diminuée de moitié dans le tube lorsque l'équilibre est établi.

TABLE DES MATIÈRES

Avant-propos. 1

CHAPITRE PREMIER

Les lois de la chimie. 1

CHAPITRE II

La synthèse chimique. 19

CHAPITRE III

Les notions de symétrie 44

CHAPITRE IV

La fonction chlorophyllienne 56

CHAPITRE V

Les diastases. 79

CHAPITRE VI

La fermentation alcoolique 107

CHAPITRE VII

La matière organisée 126

CHAPITRE VIII

La catalyse 158

CHAPITRE IX

Les équilibres chimiques 180

CHAPITRE X

Les infiniment petits chimiques. 200

CHAPITRE XI

La vie et la mort 226

APPENDICES

Théories de l'action des diastases 253
Les micelles et l'ultramicroscope 264
L'étude des substances organisées 269

ÉVREUX, IMPRIMERIE CH. HÉRISSEY, PAUL HÉRISSEY, SUCC'

Juin 1909

FÉLIX ALCAN, ÉDITEUR

LIBRAIRIES FÉLIX ALCAN ET GUILLAUMIN RÉUNIES

108, Boulevard Saint-Germain, 108, Paris, 6e.

EXTRAIT DU CATALOGUE

SCIENCES — MÉDECINE — HISTOIRE — PHILOSOPHIE
ECONOMIE POLITIQUE — STATISTIQUE — FINANCES

BIBLIOTHÈQUE SCIENTIFIQUE INTERNATIONALE

PUBLIÉE SOUS LA DIRECTION DE M. ÉMILE ALGLAVE

Volumes in-8, cartonnés à l'anglaise.

Derniers volumes publiés :

CHARLTON BASTIAN. **L'évolution de la vie**, avec figures dans le texte et 12 planches hors texte. 6 fr.

CONSTANTIN (Cne). **Le rôle sociologique de la guerre et le sentiment national.** 6 fr.

COSTANTIN (J.). **Le transformisme appliqué à l'agriculture**, illustré. 6 fr.

JAVAL. **Physiologie de la lecture et de l'écriture**, 2e éd. illustré. 6 fr.

LALOY. **Parasitisme et mutualisme dans la nature**, ill. 6 fr.

LOEB. **La dynamique des phénomènes de la vie**, ill. 9 fr.

VRIES (HUGO DE). **Espèces et variétés**, 1 vol. 12 fr.

Précédemment parus :

Sauf indication spéciale, tous ces volumes se vendent 6 *francs.*

ANGOT. **Les aurores polaires**, illustré.

ARLOING. **Les virus**, illustré.

BAIN (ALEX.). **L'esprit et le corps**, 6e édition.

— **La science de l'éducation**, 11e édition.

BAGEHOT. **Lois scientifiques du développement des nations**, 7e édition.

BENEDEN (VAN). **Les commensaux et les parasites dans le règne animal**, 4e édition, illustré.

BERKELEY, voir COOKE.

BERNSTEIN. **Les sens**, 5e édition, illustré.

BERTHELOT, de l'Institut. **La synthèse chimique**, 9e éd.

— **La révolution chimique, Lavoisier**, ill., 2e édition.

BEAUNIS. **Les sensations internes.**

BINET. **Les altérations de la personnalité.**

BINET et FÉRÉ. **Le magnétisme animal**, 5e éd., illustré.

BLASERNA et HELMHOLTZ. **Le son et la musique**, 5e éd.
BOURDEAU (L.). **Histoire du vêtement et de la parure.**
BRUCKE et HELMHOLTZ. **Principes scientifiques des beaux-arts**, 4e édition, illustré.
BRUNACHE. **Au centre de l'Afrique ; autour du Tchad**, ill.
CANDOLLE (A. de). **Origine des plantes cultivées**, 4e édit.
CARTAILHAC. **La France préhistorique**, 2e éd., illustré.
CHARLTON BASTIAN. **Le cerveau et la pensée**, 2e éd., 2 vol. illustrés.
COLAJANNI. **Latins et Anglo-Saxons.** 9 fr.
COOKE et BERKELEY. **Les champignons**, 4e éd., illustré.
COSTANTIN (J.). **Les végétaux et les milieux cosmiques** (*Adaptation, évolution*), illustré.
— **La nature tropicale**, illustré.
DAUBRÉE, de l'Institut. **Les régions invisibles du globe et des espaces célestes**, 2e édition, illustré.
DEMOOR, MASSART et VANDERVELDE. **L'évolution régressive en biologie et en sociologie**, illustré.
DEMENY (G.). **Les bases scientifiques de l'éducation physique**, 4e éd., illustré.
— **Mécanisme et éducation des mouvements**, 3e édition, illustré. 9 fr.
DRAPER. **Les conflits de la science et de la religion**, 12e éd.
DREYFUS. **L'évolution des mondes et des sociétés**, 3e édit.
DUMONT (Léon). **Théorie scientifique de la sensibilité**, 4e éd.
FÉRÉ, voir Binet.
FUCHS. **Les volcans et les tremblements de terre**, 6e éd. ill.
GARNIER, voir Guignet.
GELLÉ (E.-M.). **L'audition et ses organes**, illustré.
GROSSE (E.). **Les débuts de l'art**, illustré.
GRASSET (J.). **Les maladies de l'orientation et de l'équilibre**, illustré.
GUIGNET (E.) et E. GARNIER. **La céramique ancienne et moderne**, illustré.
HELMHOLTZ, voir Blaserna.
HERBERT SPENCER. **Introduction à la science sociale**, 14e éd.
— **Les bases de la morale évolutionniste**, 7e édition.
HUXLEY (Th.-H.). **L'écrevisse**, 2e édition, illustré.
JACCARD. **Le pétrole, le bitume et l'asphalte**, illustré.
LAGRANGE (F.). **Physiologie des exercices du corps**, 10e éd.
LANESSAN (de). **Introduction à la botanique. *Le sapin***, 2e édit., illustré.
— **Principes de colonisation.**
LE DANTEC. **Théorie nouvelle de la vie**, 4e éd., illustré.
— **Évolution individuelle et hérédité.**
— **Les lois naturelles**, illustré.
LUBBOCK. **Les sens et l'instinct chez les animaux**, ill.
MALMÉJAC. **L'eau dans l'alimentation**, illustré.

MANTEGAZZA. **La physionomie et l'expression des sentiments**, 3e édit., illustré, avec 8 pl. hors texte.
MASSART, voir DEMOOR.
MAUDSLEY. **Le crime et la folie**, 7e édition.
MEUNIER (STANISLAS). **La géologie comparée**, illustré.
— **Géologie expérimentale**, 2e éd., illustré.
— **La géologie générale**, 2e édit., illustré.
MEYER (de). **Les organes de la parole**, illustré.
MORTILLET (G. de). **Formation de la nation française**, 2e édition, illustré.
MOSSO. **Les exercices physiques et le développement intellectuel.**
NIEWENGLOWSKI. **La photographie et la photochimie**, illust.
NORMAN LOCKYER. **L'évolution inorganique**, illustré.
PERRIER (ED.), de l'Institut. **La philosophie zoologique avant Darwin**, 3e édition.
PETTIGREW. **La locomotion chez les animaux**, 2e éd., ill.
QUATREFAGES (A. DE). **L'espèce humaine**, 13e édition.
— **Darwin et ses précurseurs français**, 2e édition.
— **Les émules de Darwin**, 2 vol.
RICHET (Ch.). **La chaleur animale**, illustré.
ROBERTY (de). **La sociologie**, 3e édition.
ROMANES. **L'intelligence des animaux**, 3e éd., 2 vol.
ROCHÉ. **La culture des mers en Europe**, illustré.
ROOD (O.-N.). **Théorie scientifique des couleurs et leurs applications à l'art et à l'industrie**, 2e édition, illustré.
SCHMIDT. **Descendance et darwinisme**, 6e édition.
— **Les mammifères dans leurs rapports avec leurs ancêtres géologiques**, illustré.
SCHUTZENBERGER, de l'Institut. **Les fermentations**, 6e édit. illustré.
SECCHI (Le Père). **Les étoiles**, 3e édit., 2 vol. illustrés.
STALLO. **La matière et la physique moderne**, 3e édition.
STARCKE. **La famille primitive.**
STEWART (BALFOUR). **La conservation de l'énergie**, 6e éd.
SULLY (JAME). **Les illusions des sens et de l'esprit**, 3e éd., ill.
THURSTON. **Histoire de la machine à vapeur**, 3e éd., 2 vol.
TROUESSART. **Microbes, ferments et moisissures**, 2e éd., illustré.
TOPINARD. **L'homme dans la nature**, illustré.
TYNDALL (J.). **Les glaciers et les transform. de l'eau**, 7e éd., ill.
VANDERVELDE, voir DEMOOR.
WHITNEY. **La vie du langage**, 4e édition.
WURTZ, de l'Institut. **La théorie atomique**, 8e édition.

NOUVELLE COLLECTION SCIENTIFIQUE

VOLUMES IN-16 A 3 FR. 50 L'UN

Éléments de philosophie biologique, par F. LE DANTEC, chargé du cours de biologie générale à la Sorbonne. 1 vol. in-16. 2e éd. . . . . 3 fr. 50

La voix. *Sa culture physiologique. Théorie nouvelle de la phonation*, par le Dr P. BONNIER, laryngologiste de la clinique médicale de l'Hôtel-Dieu, 2e éd. in-16. 3 fr. 50

De la méthode dans les sciences :

1. *Avant-propos*, par M. P.-F. THOMAS, docteur ès lettres, professeur de philosophie au lycée Hoche. — 2. *De la science*, par M. ÉMILE PICARD, de l'Institut. — 3. *Mathématiques pures*, par M. J. TANNERY, de l'Institut. — 4. *Mathématiques appliquées*, par M. PAINLEVÉ, de l'Institut. — 5. *Physique générale*, par M. BOUASSE, professeur à la Faculté des Sciences de Toulouse. — 6. *Chimie*, par M. JOB, professeur au Conservatoire des arts et métiers. — 7. *Morphologie générale*, par M. GIARD, de l'Institut. — 8. *Physiologie*, par M. LE DANTEC, chargé de cours à la Sorbonne. — 9. *Sciences médicales*, par M. PIERRE DELBET, professeur à la Faculté de médecine de Paris. — 10. *Psychologie*, par M. TH. RIBOT, de l'Institut. — 11. *Sciences sociales*, par M. DURKHEIM, professeur à la Sorbonne. — 12. *Morale*, par M. LÉVY-BRUHL, professeur à la Sorbonne. — 13. *Histoire*, par M. G. MONOD, de l'Institut. 1 vol. in-16 . . . . . 3 fr. 50

L'éducation dans la famille. *Les péchés des parents*, par P.-F. THOMAS, professeur. 1 vol. in-16. 2e édit. . . 3 fr. 50

La crise du transformisme, par F. LE DANTEC. in-16. 3 fr. 50

COLLECTION MÉDICALE

ÉLÉGANTS VOLUMES IN-12, CARTONNÉS A L'ANGLAISE, A 4 ET A 3 FRANCS

Derniers volumes publiés :

La mimique chez les aliénés par le Dr G. DROMARD. 4 fr.

L'amnésie, par les Drs DROMARD et LEVASSORT. 4 fr.

La mélancolie, par le Dr R. MASSELON. 4 fr. (*Couronné par l'Académie de Médecine*).

Essai sur la puberté chez la femme, par le Dr MARTHE FRANCILLON. 4 fr.

Hygiène de l'alimentation dans l'état de santé et de maladie, par le Dr J. LAUMONIER, avec gravures. 3e éd. 4 fr.

Les nouveaux traitements, par *le même*. 2e édit. 4 fr.

Les embolies bronchiques tuberculeuses, par le Dr CH. SABOURIN; avec gravures. 4 fr.

Manuel d'électrothérapie et d'électrodiagnostic, par le Dr E. ALBERT-WEIL, avec 88 gravures. 2e éd. 4 fr.

La mort réelle et la mort apparente, diagnostic et traitement de la mort apparente, par le Dr ICARD, avec gravures. 4 fr.

L'hygiène sexuelle et ses conséquences morales, par le Dr S. RIBBING, prof. à l'Univ. de Lund (Suède). 3e édit. 4 fr.

Hygiène de l'exercice chez les enfants et les jeunes gens, par le Dr F. Lagrange, lauréat de l'Institut. 8e édit. 4 fr.
De l'exercice chez les adultes, par *le même*. 6e édition. 4 fr.
Hygiène des gens nerveux, par le Dr Levillain, 5e éd. 4 fr.
L'éducation rationnelle de la volonté, son emploi thérapeutique, par le Dr Paul-Emile Lévy. Préface de M. le prof. Bernheim. 6e édition. 4 fr.
L'idiotie. *Psychologie et éducation de l'idiot*, par le Dr J. Voisin, médecin de la Salpêtrière, avec gravures. 4 fr.
La famille névropathique, *Hérédité, prédisposition morbide, dégénérescence*, par le Dr Ch. Féré, 2e édition. 4 fr.
L'instinct sexuel. *Évolution, dissolution*, par *le même*. 2e éd. 4 fr.
Le traitement des aliénés dans les familles, par *le même*. 3e édition. 4 fr.
L'hystérie et son traitement, par le Dr Paul Sollier. 4 fr.
Manuel de psychiatrie, par le Dr J. Rogues de Fursac. 3e éd. 4 fr.
L'éducation physique de la jeunesse, par A. Mosso, professeur à l'Université de Turin. 4 fr.
Manuel de percussion et d'auscultation, par le Dr P. Simon, professeur à la Faculté de médecine de Nancy, avec grav. 4 fr.
Manuel théorique et pratique d'accouchements, par le Dr A. Pozzi, professeur à l'Ecole de médecine de Reims, avec 138 gravures. 4e édition. 4 fr.
Morphinisme et Morphinomanie, par le Dr Paul Rodet. (*Couronné par l'Académie de médecine.*) 4 fr.
La fatigue et l'entraînement physique, par le Dr Ph. Tissié, avec gravures. Préface de M. le prof. Bouchard. 3e édition. 4 fr.
Les maladies de la vessie et de l'urèthre chez la femme, par le Dr Kolischer ; avec gravures. 4 fr.
Grossesse et accouchement, par le Dr G. Morache, professeur de médecine légale à l'Université de Bordeaux. 4 fr.
Naissance et mort, par *le même*. 4 fr.
La responsabilité, par *le même*. 4 fr.
Traité de l'intubation du larynx *chez l'enfant et chez l'adulte*, par le Dr A. Bonain, avec 42 gravures. 4 fr.
Pratique de la chirurgie courante, par le Dr M. Cornet. Préface du Pr Ollier, avec 141 gravures. 4 fr.

Dans la même collection :

COURS DE MÉDECINE OPÉRATOIRE
de M. le Professeur **Félix Terrier :**

Petit manuel d'antisepsie et d'asepsie chirurgicales, par les Drs Félix Terrier et M. Péraire, avec grav. 3 fr.
Petit manuel d'anesthésie chirurgicale, par *les mêmes*, avec 37 gravures. 3 fr.
L'opération du trépan, par *les mêmes*, avec 222 grav. 4 fr.
Chirurgie de la face, par les Drs Félix Terrier, Guillemain et Malherbe, avec gravures. 4 fr.
Chirurgie du cou, par *les mêmes*, avec gravures. 4 fr.
Chirurgie du cœur et du péricarde, par les Drs Félix Terrier et E. Reymond, avec 79 gravures. 3 fr.
Chirurgie de la plèvre et du poumon, par *les mêmes*, avec 67 gravures. 4 fr.

MÉDECINE

Dernières publications :

BOUCHARDAT (les prof. A. et G.). **Nouveau Formulaire Magistral**, précédé de généralités sur l'art de formuler, de Notions sur l'emploi des contrepoisons, sur les secours à donner aux empoisonnés et aux asphyxiés, suivi d'un précis sur les eaux minérales et artificielles, de notes sur l'Opothérapie, la Sérothérapie, la Vaccination, l'Hygiène thérapeutique, le régime déchloruré, de la liste des mets permis aux glycosuriques et d'un mémorial thérapeutique. 34e édition, collationnée avec le nouveau Codex de 1908, revue et augmentée de formules nouvelles. 1 vol. in-16 cartonné . . . . . 4 fr.

BOUCHUT ET DESPRÉS. **Dictionnaire de médecine et de thérapeutique médicale et chirurgicale**, comprenant le résumé de la médecine et de la chirurgie, les indications thérapeutiques de chaque maladie, la médecine opératoire, les accouchements, l'oculistique, l'odontotechnie, les maladies d'oreilles, l'électrisation, la matière médicale, les eaux minérales, et un formulaire spécial pour chaque maladie, mis au courant de la science par les Drs Marion et F. Bouchut. 7e édition, très augmentée, 1 vol. in-4, avec 1097 fig. dans le texte et 3 cartes. Broché, 25 fr. ; relié: 30 fr.

CAMUS ET PAGNIEZ. **Isolement et psychothérapie.** *Traitement de la neurasthénie.* Préface du Pr Déjerine. 1 vol. gr. in-8. 9 fr.

CORNIL (le prof. V.). **Les tumeurs du sein.** 1 vol. gr. in-8, avec 169 fig. dans le texte. 12 fr.

CORNIL (V.), RANVIER, BRAULT ET LETULLE. **Manuel d'histologie pathologique.** 3e édition entièrement remaniée.

Tome I, par MM. Ranvier, Cornil, Brault, F. Bezançon et M. Cazin. — *Histologie normale. — Cellules et tissus normaux. — Généralités sur l'histologie pathologique. — Altération des cellules et des tissus. — Inflammations. — Tumeurs. — Notions sur les bactéries. — Maladies des systèmes et des tissus. — Altérations du tissu conjonctif.* 1 vol. in-8, avec 387 gravures en noir et en couleurs. 25 fr.

Tome II, par MM. Durante, Jolly, Dominici, Gombault et Phillipe. — *Muscles. — Sang et hématopoïèse. — Généralités sur le système nerveux.* 1 vol. in-8, avec 278 grav. en noir et en couleurs. 25 fr.

Tome III, par MM. Gombault, Nageotte, A. Riche, R. Marie, Durante, Legry, F. Bezançon. — *Cerveau. — Moelle. — Nerfs. — Cœur. — Larynx. — Ganglion lymphatique. — Rate.* 1 vol. in-8, avec 382 grav. en noir et en couleurs. 35 fr.

Tome IV et dernier, par MM. Milian, Dieulafé, Herpin, Decloux, Critzmann, Courcoux, Brault, Legry, Hallé, Klippel et Lefas. — *Poumon. — Bouche. — Tube digestif. — Estomac. — Intestin. — Foie. — Rein. — Vessie et urèthre. — Rate.* (*Sous presse. Paraîtra fin 1909*).

CYON (E. de). **Les nerfs du cœur.** 1 vol. gr. in-8 avec fig. 6 fr.

DESCHAMPS (A.). **Les maladies de l'énergie.** Les asthénies générales. *Épuisements, insuffisances, inhibitions.* (Clinique et Thérapeutique). Préface de M. le professeur Raymond. 1 vol. in-8, 2e édit. 8 fr. (*Couronné par l'Académie de médecine*).

DURET (le prof. H.). **Les tumeurs de l'encéphale.** (*Manifestations et Chirurgie*). 1 vol. grand in-8 avec 297 figures dans le texte. 20 fr.

ESTOR. (le prof.) **Guide pratique de chirurgie infantile.** 1 vol. in-8, avec 165 gravures. 2e édition, revue et augmentée. 8 fr.

FINGER (E.). **La syphilis et les maladies vénériennes.** Trad. de l'allemand avec notes par les docteurs Spillmann et Doyon. 3e édit. 1 vol. in-8, avec 8 planches hors texte. 12 fr.

FLEURY (Maurice de), de l'Académie de médecine. **Manuel pour l'étude des maladies du système nerveux.** 1 vol. gr. in-8, avec 132 grav. en noir et en couleurs, cart. à l'angl. 25 fr.

FRENKEL (H. S.). **L'ataxie tabétique.** *Ses origines, son traitement.* Préface de M. le Prof. RAYMOND. 1 vol. in 8. 8 fr.

HARTENBERG (P.). **Psychologie des neurasthéniques.** 2e édition. 1 vol. in-16. . . . . 3 fr. 50

HENNEQUIN ET LOEWY. **Les luxations des grandes articulations, leur traitement pratique.** 1 vol. gr. in-8, avec 125 grav. dans le texte. 16 fr.

OFFROY (le prof.) et DUPOUY. **Fugues et vagabondage.** 1 vol. in-8 . . . . . 7 fr.

LABADIE-LAGRAVE ET LEGUEU. **Traité médico-chirurgical de gynécologie.** 3e édition entièrement remaniée. 1 vol. grand in-8, avec nombreuses fig., cart. à l'angl. 25 fr.

LAGRANGE (F.). **Le traitement des affections du cœur par l'exercice et le mouvement.** 1 vol. in-8, avec fig. et une carte hors texte. 6 fr.

LE DANTEC (F.). **Traité de biologie.** 1 vol. grand in-8, avec fig., 2e éd. 15 fr.

— **Introduction à la pathologie générale.** 1 fort vol. gr. in-8. 15 fr.

LEPINE (le prof. R.). **Le Diabète sucré.** 1 vol. gr. in-8. . . 16 fr.

NIMIER (H.). **Blessures du crâne et de l'encéphale par coup de feu.** 1 vol. in-8, avec 150 fig. 15 fr.

SÉRIEUX et CAPGRAS. **Les folies raisonnantes.** 1 vol. in-8. 7 fr.

TERRIER (le prof. F.) et AUVRAY (M.). **Chirurgie du foie et des voies biliaires.** — TOME I. *Traumatismes du foie et des voies biliaires. — Foie mobile. — Tumeurs du foie et des voies biliaires.* 1901. 1 vol. gr. in-8, avec 50 gravures. 10 fr.

TOME II. *Echinococcose hydatique commune. — Kystes alvéolaires. — Suppurations hépatiques. — Abcès tuberculeux intra-hépatique. — Abcès de l'actinomycose.* 1907. 1 vol. gr. in-8, avec 47 gravures. 12 fr.

UNNA. **Thérapeutique des maladies de la peau.** Traduit de l'allemand par les Drs DOYON et SPILLMANN. 1 vol. gr. in-8. 8 fr.

PRÉCÉDEMMENT PARUS :

A. — Pathologie et thérapeutique médicales.

BERGER et LOEWY. **Les troubles oculaires d'origine génitale chez la femme.** 1 vol. in-18. 3 fr. 50

FÉRÉ (Ch.). **Les épilepsies et les épileptiques.** 1 vol. gr. in-8, avec 12 planches hors texte et 67 grav. dans le texte. 20 fr.

— **La pathologie des émotions.** 1 vol. in-8. 12 fr.

FLEURY (Maurice de), de l'Académie de médecine. **Introduction à la médecine de l'esprit.** 8e édit. 1 vol. in-8. 7 fr. 50. (*Couronné par l'Académie française et par l'Académie de médecine.*)

— **Les grands symptômes neurasthéniques.** 3e édition, revue 1 vol. in-8. (*Couronné par l'Académie des sciences.*) 7 fr. 50

GRASSET. **Les maladies de l'orientation et de l'équilibre** 1 vol. in-8, cart. à l'angl. 6 fr.

— **Demifous et demiresponsables.** 2e édition. 1 vol. in-8.. 5 fr.

GUÉPIN. **Traitement de l'hypertrophie sénile de la prostate.** 1 vol. in-18. 4 fr. 50

JANET (P.) ET RAYMOND (F.). **Névroses et idées fixes.** TOME I. — *Études expérimentales*, par P. JANET. 2e éd. 1 vol. gr. in-8, avec 98 gr. 12 fr.

TOME II. *Fragments des leçons cliniques*, par F. RAYMOND et P. JANET. 2e éd.. 1 vol. grand in-8, avec 97 gravures. 14 fr.

(*Couronné par l'Académie des Sciences et par l'Académie de médecine.*)

JANET (P.) ET RAYMOND (F.). **Les obsessions et la psychasthénie.** TOME I. — *Etudes cliniques et expérimentales*, par P. JANET. 2e édit. 1 vol. gr. in-8, avec grav. dans le texte. 18 fr.
TOME II. — *Fragments des leçons cliniques*, par F. RAYMOND et P. JANET. 1 vol. in-8 raisin, avec 22 gravures dans le texte. 14 fr.
LAGRANGE (F.). **Les mouvements méthodiques et la « mécanothérapie ».** 1 vol. in-8, avec 55 gravures dans le texte. 10 fr.
— **La médication par l'exercice.** 1 vol. gr. in-8, avec 68 grav. et une planche en couleurs hors texte. 2e éd. 12 fr.
— **Le traitement des affections du cœur par l'exercice et le mouvement.** 1 vol. in-8 avec figures. 6 fr.
MARVAUD (A.). **Les maladies du soldat.** 1 vol. grand in-8. (*Ouvrage couronné par l'Académie des sciences.*) 20 fr.
MOSSÉ. **Le diabète et l'alimentation aux pommes de terre.** 1 vol. in-8. 5 fr.
SOLLIER (P.). **Genèse et nature de l'hystérie.** 2 vol. in-8. 20 fr.
VOISIN (J.). **L'épilepsie.** 1 vol. in-8. 6 fr.

B. — Pathologie et thérapeutique chirurgicales.

DE BOVIS. **Le cancer du gros intestin.** 1 volume in-8. 5 fr.
DELORME. **Traité de chirurgie de guerre.** 2 vol. gr. in-8. TOME I, 16 fr. — TOME II, 26 fr. (*Ouvrage couronné par l'Académie des sciences.*)
DURET (H.). **Les tumeurs de l'encéphale.** *Manifestations et chirurgie.* 1 fort vol. gr. in-8, avec 300 figures. 20 fr.
LEGUEU. **Leçons de clinique chirurgicale** (Hôtel-Dieu, 1901). 1 vol. grand in-8, avec 71 gravures dans le texte. 12 fr.
LIEBREICH. **Atlas d'ophtalmoscopie,** représentant l'état normal et les modifications pathologiques du fond de l'œil vues à l'ophtalmoscope. 3e éd. Atlas in-f° de 12 pl. en coul et texte explicatif. 40 fr.
NIMIER (H.) ET DESPAGNET. **Traité élémentaire d'ophtalmologie.** 1 fort vol. gr. in-8, avec 432 gravures. Cart. à l'angl. 20 fr.
NIMIER (H.) ET LAVAL. **Les projectiles de guerre** et leur action vulnérante. 1 vol. in-12, avec grav. 3 fr.
— **Les explosifs, les poudres, les projectiles d'exercice,** leur action et leurs effets vulnérants. 1 vol. in-12, avec grav. 3 fr.
— **Les armes blanches,** leur action et leurs effets vulnérants. 1 vol. in-12, avec grav. 6 fr.
— **De l'infection en chirurgie d'armée,** évolution des blessures de guerre. 1 vol. in-12, avec grav. 6 fr.
— **Traitement des blessures de guerre.** 1 fort vol. in-12, avec gravures. 6 fr.
F. TERRIER ET M. PÉRAIRE. **Manuel de petite chirurgie.** 8e édition, entièrement refondue. 1 fort vol. in-12, avec 572 fig., cartonné à l'anglaise. 8 fr.

C. — Thérapeutique. Pharmacie. Hygiène.

BOSSU. **Petit compendium médical.** 6e édit. in-32, cart. 1 fr. 25
BOUCHARDAT. **Nouveau formulaire magistral.** 31e édition. *Collationnée avec le Codex de 1908.* 1 vol. in-18, cart. 4 fr.
BOUCHARDAT ET DESOUBRY. **Formulaire vétérinaire,** 6e édit. 1 vol. in-18, cartonné. 4 fr.
BOURGEOIS (G.). **Exode rural et tuberculose.** 1 vol. gr. in-8. 5 fr.
LAGRANGE (F.). **La médication par l'exercice.** 1 vol. grand in-8, avec 68 grav. et une carte en couleurs. 2e éd. 12 fr.
— **Les mouvements méthodiques et la « mécanothérapie ».** 1 vol. in-8, avec 55 gravures. 10 fr.
LAHOR (Dr Cazalis) et Lucien GRAUX. **L'alimentation à bon marché saine et rationnelle.** 1 vol. in-16. 2e édit. 3 fr. 50
(Couronné par l'Institut).

D. — Anatomie. Physiologie.

BELZUNG. **Anatomie et physiologie végétales.** 1 fort volume in-8, avec 1700 gravures. 20 fr.

— **Anatomie et physiologie animales.** 10e édition revue. 1 fort volume in-8, avec 522 gravures dans le texte, broché, 6 fr.; cart. 7 fr.

BÉRAUD (B.-J.). **Atlas complet d'anatomie chirurgicale topographique,** composé de 100 planches représentant plus de 200 figures gravées sur acier, avec texte explicatif. 1 fort vol. in-4.

Prix : Fig. noires, relié, 60 fr. — Fig. coloriées, relié, 120 fr.

CHASSEVANT. **Précis de chimie physiologique.** 1 vol. gr. in-8, avec figures. 10 fr.

DEBIERRE. **Traité élémentaire d'anatomie de l'homme.** Ouvrage complet en 2 volumes. 40 fr.

TOME I. *Manuel de l'amphithéâtre.* 1 vol. gr. in-8 de 950 pages, avec 450 figures en noir et en couleurs dans le texte. 20 fr.

TOME II. 1 vol. gr. in-8, avec 515 figures en noir et en couleurs dans le texte. (*Couronné par l'Académie des Sciences.*) 20 fr.

— **Atlas d'ostéologie,** comprenant les articulations des os et les insertions musculaires. 1 vol. in-4, avec 253 grav. en noir et en couleurs, cart. toile dorée. 12 fr.

— **Leçons sur le péritoine.** 1 vol. in-8, avec 58 figures. 4 fr.

— **L'embryologie en quelques leçons.** 1 vol. in-8, avec 144 fig. 4 fr.

— **Le cerveau et la moelle épinière.** 1 vol. in-8 avec fig. et planches. 15 fr.

DEMENY (G.). **Mécanisme et éducation des mouvements.** 3e éd. 1 vol. in-8, avec grav. cart. 9 fr.

FAU. **Anatomie des formes du corps humain,** à l'usage des peintres et des sculpteurs. 1 atlas in-folio de 25 planches. Prix : Figures noires, 15 fr. — Figures coloriées. 30 fr.

FÉRÉ. **Travail et plaisir.** *Études de psycho-mécanique.* 1 vol. gr. in-8, avec 200 fig. 12 fr.

GELLÉ. **L'audition et ses organes.** 1 vol. in-8, avec grav. 6 fr.

GLEY (E.). **Études de psychologie physiologique et pathologique.** 1 vol. in-8 avec gravures. 5 fr.

GRASSET (J.). **Les limites de la biologie.** 6e édit. Préface de Paul BOURGET. 1 vol. in-16. 2 fr. 50

JAVAL (E.). **Physiologie de la lecture et de l'écriture.** 1 vol. in-8. 2e édit. 6 fr.

LE DANTEC. **L'unité dans l'être vivant.** *Essai d'une biologie chimique.* 1 vol. in-8. 7 fr. 50

— **Les limites du connaissable.** *La vie et les phénomènes naturels.* 2e éd.t. 1 vol. in-8. 3 fr. 75

PREYER. **Éléments de physiologie générale.** Traduit de l'allemand par M. J. SOURY. 1 vol. in-8. 5 fr.

RICHET (Ch.), professeur à la Faculté de médecine de Paris, membre de l'Académie de médecine. **Dictionnaire de physiologie,** publié avec le concours de savants français et étrangers. Formera 12 à 15 volumes grand in-8, se composant chacun de 3 fascicules; chaque volume, 25 fr.; chaque fascicule, 8 fr. 50. Sept volumes parus.

TOME I (*A-Bac*). — TOME II (*Bac-Cer*). — TOME III (*Cer-Cob*). — TOME IV (*Cob-Dig*). — TOME V (*Dic-Fac*). — TOME VI (*Fiom-Gal*). — TOME VII (*Gal-Gra*). — TOME VIII (1er fascicule) (*Gra-Hém*). (2e fascicule). (*Hém-Hop*).

SNELLEN. **Echelle typographique pour mesurer l'acuité de la vision.** 17e édition. 4 fr.

SPENCER (Herbert). **Principes de biologie,** traduit par M. CAZELLES. 4e édit. 2 forts vol. in-8. 20 fr.

BIBLIOTHÈQUE GÉNÉRALE
DES SCIENCES SOCIALES

Secrétaire de la rédaction : DICK MAY, Secrét. gén. de l'Éc. des Hautes Études sociales.

Volumes in-8 carré de 300 pages environ, cart. à l'anglaise.

Chaque volume, 6 fr.

Derniers volumes publiés :

La criminalité dans l'adolescence, par G.-L. DUPRAT. (*Couronné par l'Institut*).

La nation armée, par MM. le général BAZAINE-HAYTER, C. BOUGLÉ, E. BOURGEOIS, Cne BOURGUET, E. BOUTROUX, A. CROISET, G. DEMENY, G. LANSON, L. PINEAU, Cne POTEZ, F. RAUH.

Morales et religions, par MM. G. BELOT, L. DORISON, AD. LODS, A. CROISET, W. MONOD, E. DE FAYE, A. PUECH, le baron CARRA DE VAUX, E. EHRARDT, H. ALLIER, F. CHALLAYE.

Le droit de grève, par MM. CH. GIDE, H. BERTHÉLEMY, P. BUREAU, A. KEUFER, C. PERREAU, CH. PICQUENARD, A.-E. SAYOUS, F. FAGNOT, E. VANDERVELDE.

Les trusts et les syndicats de producteurs, par J. CHASTIN. (*Récompensé par l'Institut*).

L'individu, l'association et l'État, par E. FOURNIÈRE, prof. au Conservatoire des Arts et Métiers.

Le surpeuplement et les habitations à bon marché, par H. TUROT et H. BELLAMY.

L'individualisation de la peine, par R. SALEILLES, prof. à la Faculté de droit de l'Univ. de Paris, et G. MORIN, doc. 2e édition.

L'idéalisme social, par EUGÈNE FOURNIÈRE, 2e édit.

Ouvriers du temps passé (XVe et XVIe siècles), par H. HAUSER, professeur à l'Université de Dijon, 3e édition.

Les transformations du pouvoir, par G. TARDE, 2e édit.

Morale sociale, par MM. G. BELOT, MARCEL BERNÈS, BRUNSCHVICG, F. BUISSON, DARLU, DAURIAC, DELBET, CH. GIDE, M. KOVALEVSKY, MALAPERT, le R. P. MAUMUS, DE ROBERTY, G. SOREL, le PASTEUR WAGNER. Préface de M. ÉMILE BOUTROUX, de l'Institut. 2e édit.

Les enquêtes, *pratique et théorie*, par P. DU MAROUSSEM.

Questions de morale, par MM. BELOT, BERNÈS, F. BUISSON, A. CROISET, DARLU, DELBOS, FOURNIÈRE, MALAPERT, MOCH, D. PARODI, G. SOREL. 2e édit.

Le développement du catholicisme social, depuis l'encyclique *Rerum Novarum*, par MAX TURMANN. 2e édit.

Le socialisme sans doctrines, par A. MÉTIN.

L'éducation morale dans l'Université, par MM. LÉVY-BRUHL, DARLIN, M. BERNÈS, KORTZ, ROCAFORT, BIOCHE, Ph. GIDEL, MALAPERT, BELOT.

La méthode historique appliquée aux sciences sociales, par CH. SEIGNOBOS, professeur à l'Univ. de Paris. 2e édit.

Assistance sociale. *Pauvres et mendiants*, par PAUL STRAUSS.

L'hygiène sociale, par E. DUCLAUX, de l'Institut.

Le contrat de travail. *Le rôle des syndicats professionnels*, par P. BUREAU, professeur à la Faculté libre de droit de Paris.

Essai d'une philosophie de la solidarité, par MM. Darlu, Rauh, F. Buisson, Gide, X. Léon, La Fontaine, E. Boutroux.

L'éducation de la démocratie, par MM. E. Lavisse, A. Croiset, Seignobos, Malapert, Lanson, Hadamard. 2e édit.

L'exode rural et le retour aux champs, par E. Vandervelde.

La lutte pour l'existence et l'évolution des sociétés, par J.-L. de Lanessan, ancien ministre.

La concurrence sociale et les devoirs sociaux, par le même.

La démocratie devant la science, par C. Bouglé, chargé de cours à l'Université de Paris.

L'individualisme anarchiste. *Max Stirner*, par V. Basch, chargé de cours à l'Université de Paris.

Les applications sociales de la solidarité, par MM. P. Budin, Ch. Gide, H. Monod, Paulet, Robin, Siegfried, Brouardel.

La paix et l'enseignement pacifiste, par MM. Fr. Passy, Ch. Richet, d'Estournelles de Constant, E. Bourgeois, A. Weiss, H. La Fontaine, G. Lyon.

Études sur la philosophie morale au XIXe siècle, par MM. Belot, A. Darlu, M. Bernès, A. Landry, Ch. Gide, E. Roberty, R. Allier, H. Lichtenberger, L. Brunschvicg.

Enseignement et démocratie, par MM. A. Croiset, Devinat, Boitel, Millerand, Appell, Seignobos, Lanson, Ch.-V. Langlois.

Religions et sociétés, par MM. Th. Reinach, A. Puech, R. Allier, A. Leroy-Beaulieu, le Bon Carra de Vaux, H. Dreyfus.

Essais socialistes, *La religion, L'alcoolisme, L'art*, par E. Vandervelde, professeur à l'Université nouvelle de Bruxelles.

LES MAITRES DE LA MUSIQUE

ÉTUDES D'HISTOIRE ET D'ESTHÉTIQUE

Publiées sous la direction de M. Jean Chantavoine

Collection honorée d'une souscription du Ministère des Beaux-Arts

Chaque volume in-8 de 250 pages environ, 3 fr. 50

Publiés :

Palestrina, par Michel Brenet. 2e édition.

César Franck, par Vincent d'Indy. 4e édit.

J.-S. Bach, par André Pirro. 2e édit.

Beethoven, par Jean Chantavoine. 4e édit.

Mendelssohn, par Camille Bellaigue, 2e édition.

Smetana, par William Ritter.

Rameau, par Louis Laloy. 2e éd.

Moussorgski, par M. D. Calvocoressi.

Haydn, par Michel Brenet.

Trouvères et Troubadours, par Pierre Aubry.

Wagner, par Henri Lichtenberger.

BIBLIOTHÈQUE
D'HISTOIRE CONTEMPORAINE

Volumes in-16 et in-8

DERNIERS VOLUMES PUBLIÉS :

CHALLAYE (F.). **Au Congo français.** *La question internationale du Congo.* 1 vol. in-8. . . . . 5 fr.

DEBIDOUR, prof. à la Sorbonne. **L'Eglise catholique et l'Etat en France sous la 3e république (1870-1906).** Tome II (1889-1906). 1 vol. in-8 . . . . . 10 fr.

DRIAULT (É.). **Vue générale de l'histoire de la civilisation.** 2 vol. in-16, illustrés. (*Récompensé par l'Institut*). . . . . 7 fr.

— **Le monde actuel.** *Tableau politique et économique.* 1 vol. in-8. 7 fr.

FÈVRE et HAUSER. **Régions et pays de France.** 1 vol. in-8, illustré. . . . . 7 fr.

HANDELSMAN. **Napoléon et la Pologne (1806-1807).** 1 vol. in-8. . . . . 5 fr.

MAILATH (Cte J. de). **La Hongrie rurale, sociale et politique.** 1 vol. in-8. . . . . 5 fr.

MANTOUX (J.). **A travers l'Angleterre contemporaine.** 1 vol. in-16. Préface de G. Monod, de l'Institut. 1 vol. in-16. . . . 3 fr. 50

Socialisme à l'Etranger (Le). *Angleterre, Allemagne, Autriche, Italie, Espagne, Russie, Japon, Etats-Unis*, par MM. J. Bardoux, G. Gidel, Kinzo Goraï, G. Isambert, G. Louis-Jaray, A. Marvaud, Da Motta de San Miguel, P. Quentin-Bauchart, M. Revon, A. Tardieu. 1 vol. in-16. . . . . 3 fr. 50

Vie politique dans les Deux Mondes (La), publiées sous la direction de A. Viallate, professeur à l'Ecole des Sciences politiques. *Deuxième année (1907-1908)* 1 vol. in-8. . . . . 10 fr.

EUROPE

Histoire de l'Europe pendant la Révolution française, par *H. de Sybel*. Traduit de l'allemand par Mlle Dosquet. 6 vol. in-8. Chacun. 7 fr.

Hist. diplomatique de l'Europe (1815-1878), par *Debidour*, 2 v. in-8. 18 fr.

La question d'Orient, depuis ses origines jusqu'à nos jours, par *E. Driault* ; préface de *G. Monod*. 1 vol. in-8. 3e édit. . . . . 7 fr.

La papauté, par *I. de Dœllenger*. Trad. de l'allemand. 1 vol. in-8. 7 fr.

Questions diplomatiques de 1904, par *A. Tardieu*. 1 vol. in-16. 3 fr. 50

La conférence d'Algésiras. *Histoire diplomatique de la crise marocaine (janvier-avril 1906)*, par *le même*. 2e édit. 1 vol. in-8. 10 fr.

FRANCE

La révolution française, par *H. Carnot*. 1 vol. in-16. Nouv. éd. 3 fr. 50

La théophilanthropie et le culte décadaire (1796-1801), par *A. Mathiez*. 1 vol. in-8. . . . . 12 fr.

Contributions a l'histoire religieuse de la révolution française, par *le même*. 1 vol. in-16. . . . . 3 fr. 50

Mémoires d'un ministre du trésor public (1789-1815), par le comte *Mollien*. Publié par *M. Gomel*. 3 vol. in-8. . . . . 15 fr.

Condorcet et la révolution française, par *L. Cahen*. 1 vol. in-8. 10 fr.

Cambon et la révolution française, par *F. Bornarel*. 1 vol. in-8. 7 fr.

Le culte de la raison et le culte de l'être suprême (1793-1794). Etude historique, par *A. Aulard*. 2e éd. 1 vol. in-16. . . . . 3 fr. 50

Études et leçons sur la révolution française, par *A. Aulard*. 5 vol. in-16. Chacun . . . . . 3 fr. 50

Variétés révolutionnaires, par *M. Pellet*. 3 vol. in-16. Chacun 3 fr. 50

Hommes et choses de la Révolution, par *Eug. Spuller*. 1 vol. in-16. . . . . 3 fr. 50

Les campagnes des armées françaises (1792-1815), par *C. Vallaux*. 1 vol. in-16, avec 17 cartes. . . . . 3 fr. 50

La politique orientale de Napoléon (1806-1808), par *E. Driault*. 1 vol. in-8. . . . . 7 fr.
Napoléon et la société de son temps, par *P. Bondois*. 1 vol. in-8. 7 fr.
De Waterloo a Sainte-Hélène (20 juin-16 oct. 1815), par *J. Silvestre*, 1 vol. in-16. . . . . 3 fr. 50
Le Conventionnel Goujon, par *L. Thénard et R. Guyot* 1 vol. in-8. 5 fr.
Histoire de dix ans (1830-1840), par *Louis Blanc*. 5 vol. in-8. Chacun. 5 fr.
Associations et sociétés secrètes sous la deuxième république (1848-1851), par *J. Tchernoff*. 1 vol. in-8. . . . . 7 fr.
Histoire du second empire, par *Taxile Delord*. 6 vol. in-8. Chac. 7 fr.
Histoire du parti républicain (1814-1870), par *G. Weill*. 1 v. in-8. 10 fr.
Histoire du mouvement social (1852-1902), par *le même*. 1 v. in-8. 7 fr.
Histoire de la troisième république, par *E. Zevort* : I. *Présidence de M. Thiers*. 1 vol. in-8. 3e édit. 7 fr. — II. *Présidence du Maréchal*. 1 vol. in-8. 2e édit. 7 fr. — III. *Présidence de Jules Grévy*. 1 vol. in-8. 2e édition. 7 fr. — IV. *Présidence de Sadi-Carnot*. 1 vol. in-8. . . . 7 fr.
Histoire des rapports de l'Eglise et de l'Etat en France (1789-1870), par *A. Debidour*. 1 vol. in-8 (*Couronné par l'Institut*). . . . 12 fr.
L'Etat et les Eglises en France, Des origines à la loi de séparation, par *J.-L. de Lanessan*. 1 vol. in-16. . . . . 3 fr. 50
La société française sous la troisième république, par *Marius-Ary Leblond*. 1 vol. in-8. . . . . 5 fr.
La liberté de conscience en France (1595-1905), par *G. Bonet-Maury*. 1 vol. in-8, 2e édit. . . . . 5 fr.
Les civilisations tunisiennes, par *P. Lapie*. 1 vol. in-16. . 3 fr. 50
Les colonies françaises, par *P. Gaffarel*. 1 vol. in-8. 6e éd. . . 5 fr.
L'œuvre de la France au Tonkin, par *A. Gaisman*. 1 v. in-16. 3 fr. 50
La France hors de France. *Notre émigration, sa nécessité, ses conditions*, par *J.-B. Piolet*. 1 vol. in-8 . . . . . 10 fr.
L'Indo-Chine française (*Cochinchine, le Cambodge, l'Annam et le Tonkin*), par *J.-L. de Lanessan*. 1 vol. in-8, avec 5 cartes en couleurs. 15 fr.
L'Algérie, par *M. Wahl*. 1 vol. in-8. 5e éd., revue par *A. Bernard*. 5 fr.
La France moderne et le problème colonial (1815-1830), par *Ch. Schefer*. 1 vol. in-8. . . . . 7 fr.
L'Eglise catholique et l'Etat en France sous la troisième république (1870-1906), par *A. Debidour*. Tome I. 1870-1889. 1 vol. in-8. 7 fr.
Tome II, 1889-1906. 1 vol, in-8 . . . . . 10 fr.
L'Eveil d'un monde. *L'œuvre de la France en Afrique occidentale*, par *L. Hubert*. 1 vol. in-16. . . . . 3 fr. 50

ALLEMAGNE

Le grand-duché de Berg (1806-1813), par *Ch. Schmidt*. 1 vol. in-8. 10 fr.
Histoire de la Prusse, de la mort de Frédéric II à la bataille de Sadowa, par *E. Véron*. 1 vol. in-18. 6e éd. . . . . 3 fr. 50
Les origines du socialisme d'état en Allemagne, par *Ch. Andler*. 1 vol. in-8. . . . . 7 fr.
L'Allemagne nouvelle et ses historiens (*Niebuhr, Ranke, Mommsen, Sybel, Treitschke*), par *A. Guilland*. 1 vol. in-8 . . . . . 5 fr.
La démocratie socialiste allemande, par *E. Milhaud*. 1 vol. in-8. 10 fr.
La Prusse et la Révolution de 1848, par *P. Matter*. 1 v. in-16. 3 fr. 50
Bismarck et son temps, par *le même*. 3 vol. in-8, chacun. 10 fr. — I. *La préparation* (1815-1862). — II. *L'action* (1863-1870). — III. *Le triomphe et le déclin* (1870-1896). (*Ouvrage couronné par l'Institut*).

ANGLETERRE

Histoire contemporaine de l'Angleterre, depuis la mort de la reine Anne jusqu'à nos jours, par *H. Reynald*. 1 vol. in-16. 2e éd. 3 fr. 50
Le socialisme en Angleterre, par *Albert Métin*. 1 vol. in-16. 3 fr. 50

AUTRICHE-HONGRIE

Les Tchèques et la Bohême contemporaine, par *Bourlier*, in-16. 3 fr. 50
Les races et les nationalités en Autriche-Hongrie, par *B. Auerbach*, 1 vol. in-8. 2e édit. (*Sous presse*) . . . . . 5 fr.
Le pays magyar, par *R. Recouly*. 1 vol. in-16. . . . . 3 fr. 50

ESPAGNE

HISTOIRE DE L'ESPAGNE, depuis la mort de Charles III jusqu'à nos jours, par *H. Reynald*. 1 vol. in-16 . . . . . 3 fr. 50

GRÈCE et TURQUIE

LA TURQUIE ET L'HELLÉNISME CONTEMPORAIN, par *V. Bérard*. 1 vol. in-16. 4e éd. (*Ouvrage couronné par l'Académie française*) . . . . 3 fr. 50
BONAPARTE ET LES ILES JONIENNES (1797-1816), par *E. Rodocanachi*. 1 vol. in-8. . . . . 5 fr.

ITALIE

HISTOIRE DE L'UNITÉ ITALIENNE (1814-1871), *Bolton King*. 2 v. in-8. 15 fr.
HISTOIRE DE L'ITALIE, depuis 1815 jusqu'à la mort de Victor-Emmanuel, par *E. Sorin* 1 vol. in-16 . . . . . 3 fr. 50
BONAPARTE ET LES RÉPUBLIQUES ITALIENNES (1796-1799), par *P. Gaffarel*. 1 vol. in-8 . . . . . 5 fr.
NAPOLÉON EN ITALIE (1800-1812), par *J.-E. Driault*. 1 vol. in-8.. 10 fr.

SUISSE

HISTOIRE DU PEUPLE SUISSE, par *Daendliker*. Introd. de *Jules Favre*. In-8. 5 fr.

ROUMANIE

HISTOIRE DE LA ROUMANIE CONTEMP. (1822-1900), par *Damé*. In-8. 7 fr.

AMÉRIQUE

HISTOIRE DE L'AMÉRIQUE DU SUD, par *Alf. Deberle*. in-16. 3e éd. 3 fr. 50
L'INDUSTRIE AMÉRICAINE, par *A. Viallate*, professeur à l'Ecole des Sciences politiques. 1 vol. in-8 . . . . . 10 fr.

CHINE-JAPON

HISTOIRE DES RELATIONS DE LA CHINE AVEC LES PUISSANCES OCCIDENTALES (1861-1902), par *H. Cordier*, de l'Instit. 3 vol. in-8, avec cartes. 30 fr.
L'EXPÉDITION DE CHINE DE 1857-58, par *le même*. 1 vol. in-8. . . 7 fr.
L'EXPÉDITION DE CHINE DE 1860, par *le même*. 1 vol. in-8. . . . . 7 fr.
EN CHINE. *Mœurs et institutions*. par *M. Courant*. 1 vol. in-16 . 3 fr. 50
LE DRAME CHINOIS, par *Marcel Monnier*. 1 vol. in-16. . . . 2 fr. 50
LE PROTESTANTISME AU JAPON (1859-1907), par *R. Allier*. 1 vol. in-16. 3 fr. 50

ÉGYPTE

LA TRANSFORMATION DE L'ÉGYPTE, par *Alb. Métin*. 1 vol. in-16. 3 fr. 50

INDE

L'INDE CONTEMP. ET LE MOUVEMENT NATIONAL, par *Piriou*. In-16 3 fr. 50

QUESTIONS POLITIQUES ET SOCIALES

Despois (E.). LE VANDALISME RÉVOLUTIONNAIRE. 1 vol. in-16. 4e éd. 3 f. 50
Dumoulin (M.). FIGURES DU TEMPS PASSÉ. 1 vol. in-16. . 3 fr. 50
Driault (E.). PROBLÈMES POLITIQUES ET SOCIAUX. 2e éd. 1 vol. in-8. 7 fr.
— HISTOIRE DU MOUVEMENT SYNDICAL EN FRANCE (1789-1906). 3 fr. 50
Eichthal (Eug. d'), de l'Institut. SOUVERAINETÉ DU PEUPLE ET GOUVERNEMENT. 1 vol. in-16 . . . . . 3 fr. 50
Guyot (Yves). SOPHISMES SOCIALISTES ET FAITS ÉCONOMIQUES. 1 vol. in-16. . . . . 3 fr. 50
Lanessan (J.-L. de). LES MISSIONS ET LEUR PROTECTORAT. 1 vol. in-16. . . . . 3 fr. 50
Lichtenberger (A.) LE SOCIALISME UTOPIQUE. 1 vol. in-16. 3 fr. 50
— LE SOCIALISME ET LA RÉVOLUTION FRANÇAISE. 1 v. in-8. . . 5 fr.
Louis (Paul). L'OUVRIER DEVANT L'ÉTAT. 1 vol. in-8 . . . . . 7 fr.
Matter (Paul). LA DISSOLUTION DES ASSEMBLÉES PARLEMENTAIRES. 1 vol. in-8. . . . . 5 fr.
Reinach (J.). LA FRANCE ET L'ITALIE DEVANT L'HISTOIRE. 1 vol. in-8. 5 fr.
Schefer (G.). BERNADOTTE ROI (1810-1818-1844). 1 vol. in-8. 5 fr.
Spuller (Eug.). FIGURES DISPARUES, 3 vol. in-16, chacun . 3 fr. 50
— L'ÉDUCATION DE LA DÉMOCRATIE. 1 vol. in-16. . . . . 3 fr. 50
— L'ÉVOLUTION POLITIQUE ET SOCIALE DE L'ÉGLISE. 1 vol. in-16. 3 fr. 50

Tardieu (A.). La France et ses alliances. *La lutte pour l'équilibre.* 1 vol. in-16. . . . . 3 fr. 50
Viallate (A.). La Vie politique dans les Deux Mondes, 1re année (1906-1907). 1 fort volume in-8. . . . . 10 fr.
Weill (G.). L'École saint-simonienne. 1 vol. in-16. . . 3 fr. 50

MINISTRES ET HOMMES D'ÉTAT

Chaque volume in-16, 2 fr. 50

Bismarck, par H. Welschinger.
Prim, par H. Léonardon.
Disraeli, par M. Courcelle.
Ôkoubo, ministre japonais, par M. Courant.
Chamberlain, par A. Viallate.

BIBLIOTHÈQUE UTILE

Élégants volumes in-32, de 192 pages chacun.

Chaque volume broché, **60** *cent.; cartonné,* **1** *franc.*

Acloque (A.). Les insectes nuisibles (avec fig.).
Amigues (E.). A travers le ciel.
Bastide. Les guerres de la Réforme. 5e édit.
— Luttes religieuses des premiers siècles. 5e édit.
Beauregard (H.). Zoologie générale (avec fig.).
Bellet. (D.). Les grands ports maritimes de commerce (avec fig.).
Bère. Histoire de l'armée française.
Berget (Adrien.) La viticulture nouvelle. (*Manuel du vigneron.*) 3e éd.
— La pratique des vins. 2e éd. (*Guide du récoltant*).
— Les vins de France. (*Guide du consommateur.*)
Bertillon (Jacques). La statistique humaine de la France.
Blerzy (H.). Les colonies anglaises. 2e édit.
— Torrents, fleuves et canaux de la France. 3e édit.
Boillot. Les entretiens de Fontenelle sur la pluralité des mondes.
Bondois. (P). L'Europe contemporaine (1789-1879). 2e édit.
Bonant. Les principaux faits de la chimie (avec fig.).
— Hist. de l'eau (avec fig.).
Brothier. Histoire de la terre. 9e éd.
— Causeries sur la mécanique. 5e édit.
Buchez. Les Mérovingiens. 6e éd.
— Les Carlovingiens. 2e éd.
Carnot. Révolution française, 2 vol. 7e édit.
Catalan. Notions d'astronomie. 6e édit.
Collas (L.). Histoire de l'empire ottoman. 3e édit.
Collier. Premiers principes des beaux-arts (avec fig.).
Combes (L.). La Grèce ancienne. 4e édit.
Corbon. De l'enseignement professionnel. 4e édit.
Coste (Ad.). Alcoolisme ou épargne. 6e édit.
— Richesse et bonheur.
Coupin (H.). La vie dans les mers (avec fig.).
Creighton. Histoire romaine (avec fig.).
Cruveilhier. Hygiène générale. 9e édit.
Dallet. La navigation aérienne (avec fig.).
Debidour (A.) Histoire des rapports de l'Église et de l'État en France (1789-1871). Abrégé par Dubois et Sarthou.
Despois (Eug.). Révolution d'Angleterre. 4e édit.
Doneaud (Alfred). Histoire de la marine française. 4e édit.
— Histoire contemporaine de la Prusse. 2e édit.
Dufour. Petit dictionnaire des falsifications. 4e édit.
Enfantin. La vie éternelle. 6e éd.

Faque. L'Indo-Chine française.
Ferrière. Le darwinisme. 9e éd.
Gaffarel (Paul). La défense nationale en 1792. 2e édit.
— Les frontières françaises. 2e édit.
Gastineau (B.). Les génies de la science et de l'industrie. 3e éd
Geikie. La géologie (avec fig.). 5e édit.
Genevoix (F.). Les matières premières.
— Les procédés industriels.
Gérardin. Botanique générale) avec fig.).
Girard de Rialle. Les peuples de l'Asie et de l'Europe.
Gossin. La photographie (fig.).
— La machine à vapeur (avec fig.)
Grove. Continents et océans. 3e éd.
Hatin. Le Journal.
Henneguy. Histoire de l'Italie depuis 1815.
Huxley. Premières notions sur les sciences. 4e édit.
Jevons (Stanley). L'économie politique. 10e édit.
Jouan. Les îles du Pacifique.
— La chasse et la pêche des animaux marins.
Jourdan (J.). La justice criminelle en France. 4e édit.
Jourdy. Le patriotisme à l'école.
Joyeux. L'Afrique française.
Larbalétrier (A.). L'agriculture française (avec fig.).
— Les plantes d'appartement (avec fig.).
Larivière (Ch. de). Les origines de la guerre de 1870.
Larrivé. L'assistance publique.
Laumonier. (Dr J.) L'hygiène de la cuisine.
Leneveux. Le budget du foyer.
— Le travail manuel en France. 2e édit.
Lévy (Albert). Histoire de l'air (avec fig.). 4e édit.
Lock (F.). Jeanne d'Arc. 3e édit.
— Histoire de la Restauration. 5e édit.
Mahaffy. L'antiquité grecque (avec fig.).
Maigne. Les mines de la France et de ses colonies.
Margollé, voy. **Zurcher.**
Mayer (G.). Les chemins de fer (avec fig.).
Merklen (P.). La Tuberculose; son traitement hygiénique.
Meunier (G.). Histoire de la littérature française. 4e éd.
— Histoire de l'art (avec fig.).
Milhaud (A.). Madagascar. 2e ed.
Mongredien. Le libre-échange en Angleterre.
Monin. Les maladies épidémiques (avec fig.).
Morand. Introduction à l'étude des sciences physiques. 6e éd.
Morin. La loi civile en France. 6e édit.
Noël (Eugène). Voltaire et Rousseau. 4e édit.
Ott (A.). L'Asie occidentale et l'Egypte. 3e édit.
Paulhan (F.). La physiologie de l'esprit. 5e édit. refondue.
Paul Louis. Les lois ouvrières.
Petit. Economie rurale et agricole.
Pichat (L.). L'art et les artistes en France. 5e édit.
Quesnel. Histoire de la conquête de l'Algérie.
Raymond (E.). L'Espagne et le Portugal. 3e édit.
Regnard. Histoire contemporaine de l'Angleterre.
Renard (G.). L'homme est-il libre? 5e édit.
Robinet. La philosophie positive. 6e édit.
Rolland (Ch.). Histoire de la maison d'Autriche. 4e édit.
Sérieux et Mathieu. L'Alcool et l'alcoolisme. 4e édit.
Spencer (Herbert). De l'éducation. 12e édit.
Turck. Médecine populaire. 7e édit.
Vaillant. Petite chimie de l'agriculteur.
Wilkins. L'antiquité romaine (avec fig.). 2e édit.
Zaborowski (S.). L'homme préhistorique. 7e édit.
— Les mondes disparus (avec fig.) 4e édit.
— Les grands singes.
— L'origine du langage. 6e édit.
— Les migrations des animaux. 4e édit.
Zevort (Edg.). Histoire de Louis-Philippe. 4e édit.
Zurcher (F.). Les phénomènes de l'atmosphère. 7e édit.
Zurcher et Margollé. Télescope et microscope. 3e édit.
— Les phénomènes célestes. 3e éd.

BIBLIOTHÈQUE
DE PHILOSOPHIE CONTEMPORAINE

VOLUMES IN-16.
Brochés, 2 fr. 50.

Derniers volumes publiés :

J. Bourdeau
Pragmatisme et modernisme.

G. Compayré.
L'adolescence.

Em. Cramaussel.
Le premier éveil intellectuel de l'enfant.

E. d'Eichthal.
Pages sociales.

J. Girod.
Démocratie, patrie et humanité.

A. Joussain.
Le fondement psychologique de la morale.

G. Palante.
La sensibilité individualiste.

Fr. Paulhan.
La morale de l'ironie.

A. Schopenhauer.
Métaphysique et esthétique.

Alaux.
Philosophie de Victor Cousin.

R. Allier.
Philosophie d'Ernest Renan. 3e éd.

L. Arréat.
La morale dans le drame. 3e édit.
Mémoire et imagination. 2e édit.
Les croyances de demain.
Dix ans de philosophie (1890-1900).
Le sentiment religieux en France.
Art et psychologie individuelle.

G. Aslan.
Expérience et Invention en morale.

G. Ballet.
Langage intérieur et aphasie. 2e éd.

A. Bayet.
La morale scientifique. 2e édit.

Beaussire.
Antécédents de l'hégélianisme.

Bergson.
Le rire. 5e édit.

Binet.
Psychologie du raisonnement. 4e éd.

Hervé Blondel.
Les approximations de la vérité.

C. Bos.
Psychologie de la croyance. 2e éd.
Pessimisme, féminisme, moralisme.

M. Boucher.
Essai sur l'hyperespace. 2e éd.

C. Bouglé.
Les sciences sociales en Allemagne.
Qu'est-ce que la sociologie?

J. Bourdeau.
Les maîtres de la pensée. 5e éd.
Socialistes et sociologues. 2e édit.

E. Boutroux.
Conting. des lois de la nature. 6e éd.

Brunschvicg.
Introd. à la vie de l'esprit. 2e éd.
L'idéalisme contemporain.

C. Coignet.
Protestantisme français au XIXe siècle

Coste.
Dieu et l'âme. 2e édit.

A. Cresson.
Bases de la philos. naturaliste.
Le malaise de la pensée philos.
La morale de Kant. 2e éd.

G. Danville.
Psychologie de l'amour. 4e édit.

L. Dauriac.
La psychol. dans l'Opéra français.

J. Delvolvé.
L'organisation de la conscience morale.

L. Dugas.
Psittacisme et pensée symbolique.
La timidité. 4e édit.
Psychologie du rire.
L'absolu.

L. Duguit.
Le droit social, le droit individuel et la transformation de l'État.

G. Dumas.
Le sourire.

Dunan.
Théorie psychologique de l'espace.

Duprat.
Les causes sociales de la folie.
Le mensonge. 2e édit.

Durand (de Gros).
Philosophie morale et sociale.

E. Durkheim.
Les règles de la méthode sociol. 4e éd.

E. d'Eichthal.
Corr. de S. Mill et G. d'Eichthal.
Les probl. sociaux et le socialisme.

Encausse (Papus).
Occultisme et spiritualisme. 2e éd.

A. Espinas.
La philos. expériment. en Italie.

E. Faivre.
De la variabilité des espèces.

Ch. Féré.
Sensation et mouvement. 2e édit.
Dégénérescence et criminalité. 4e éd.

E. Ferri.
Les criminels dans l'art.

Fierens-Gevaert.
Essai sur l'art contemporain. 2e éd.
La tristesse contemporaine. 5e éd.
Psychol. d'une ville. Bruges. 3e éd.
Nouveaux essais sur l'art contemp.

Maurice de Fleury.
L'âme du criminel. 2e éd.

Fonsegrive.
La causalité efficiente.

A. Fouillée.
Propriété sociale et démocratie.

E. Fournière.
Essai sur l'individualisme. 2e édit.

Gauckler.
Le beau et son histoire.

G. Geley.
L'être subconscient. 2e édit.

E. Goblot.
Justice et liberté. 2e édit.

A. Godfernaux.
Le sentiment et la pensée. 2e édit.

J. Grasset.
Les limites de la biologie. 5e édit.

G. de Greef.
Les lois sociologiques. 4e édit.

Guyau.
La genèse de l'idée de temps. 2e éd.

E. de Hartmann.
La religion de l'avenir. 7e édition.
Le Darwinisme. 8e édition.

R. C. Herckenrath.
Probl. d'esthétique et de morale.

Marie Jaëll.
L'intelligence et le rythme dans les mouvements artistiques.

W. James.
La théorie de l'émotion. 3e édit.

Paul Janet.
La philosophie de Lamennais.

Jankelevitch.
Nature et société.

J. Lachelier.
Du fondement de l'induction. 5e éd.
Études sur le syllogisme.

C. Laisant.
L'Éducation fondée sur la science.

Mme Lampérière.
Le rôle social de la femme.

A. Landry.
La responsabilité pénale.

Lange.
Les émotions. 2e édit.

Lapie.
La justice par l'État.

Laugel.
L'optique et les arts.

Gustave Le Bon.
Lois psychol. de l'évol. des peuples.
Psychologie des foules. 14e éd.

F. Le Dantec.
Le déterminisme biologique. 3e éd.
L'individualité et l'erreur individualiste. 3e édit.
Lamarckiens et darwiniens. 3e éd.

G. Lefèvre.
Obligation morale et idéalisme.

Liard.
Les logiciens anglais contem. 5e éd.
Définitions géométriques. 3e édit.

H. Lichtenberger.
La philosophie de Nietzsche. 11e éd.
Aphorismes de Nietzsche. 4e éd.

O. Lodge.
La vie et la matière. 2e édit.

Lombroso.
L'anthropologie criminelle. 5e éd.

John Lubbock.
Le bonheur de vivre. 2 vol. 11e éd.
L'emploi de la vie. 7e édit.

G. Lyon.
La philosophie de Hobbes.

E. Marguery.
L'œuvre d'art et l'évolution. 2e édit.

Manxion.
L'éducation par l'instruction. 2e éd.
Nature et éléments de la moralité.

G. Milhaud.
Les conditions et les limites de la certitude logique. 2e édit.
Le rationnel.

Mosso.
La peur. 4e éd.
La fatigue intellect. et phys. 6e éd.

E. Murisier.
Les mal. du sent. religieux. 3e éd.

A. Naville.
Nouvelle classif. des sciences. 2e éd.

Max Nordau.
Paradoxes psychologiques. 6e éd.
Paradoxes sociologiques. 5e édit.
Psycho-physiologie du génie. 4e éd.

Novicow.
L'avenir de la race blanche. 2e édit.

Ossip-Lourié.
Pensées de Tolstoï. 2e édit.
Philosophie de Tolstoï. 2e édit.
La philos. soc. dans le théât. d'Ibsen.
Nouvelles pensées de Tolstoï.
Le bonheur et l'intelligence.
Croyance religieuse et croyance intellectuelle.

G. Palante.
Précis de sociologie. 4e édit.

W.-R. Paterson (SWIFT).
L'éternel conflit.

Paulhan.
Les phénomènes affectifs. 2e édit.
Psychologie de l'invention.
Analystes et esprits synthétiques.
La fonction de la mémoire.

J. Philippe.
L'image mentale.

J. Philippe et G. Paul-Boncour.
Les anomalies mentales chez les écoliers. 2e édit.

F. Pillon.
La philosophie de Charles Secrétan.

Pioger.
Le monde physique.

L. Proal.
L'éducation et le suicide des enfants.

Queyrat.
L'imagination chez l'enfant. 4e édit.
L'abstraction. 2e édit.
Les caractères et l'éducation morale.
La logique chez l'enfant. 3e éd.
Les jeux des enfants. 2e édit.

G. Rageot.
Les savants et la philosophie.

P. Regnaud.
Précis de logique évolutionniste.
Comment naissent les mythes.

G. Renard.
Le régime socialiste. 6e édit.

A. Réville.
Divinité de Jésus-Christ. 4e éd.

A. Rey.
L'énergétique et le mécanisme.

Th. Ribot.
La philos. de Schopenhauer. 12e éd.
Les maladies de la mémoire. 20e éd.
Les maladies de la volonté. 25e éd.
Les mal. de la personnalité. 14e édit.
La psychologie de l'attention. 10e éd.

G. Richard.
Socialisme et science sociale. 2e éd.

Ch. Richet.
Psychologie générale. 7e éd.

De Roberty.
L'agnosticisme. 2e édit.
La recherche de l'Unité.
Psychisme social.
Fondements de l'éthique.
Constitution de l'éthique.
Frédéric Nietzsche.

E. Rocrich.
L'attention spontanée et volontaire.

J. Rogues de Fursac.
Mouvement mystique contemp.

Roisel.
De la substance.
L'idée spiritualiste. 2e édit.

Roussel-Despierres.
L'idéal esthétique.

Rzewuski.
L'optimisme de Schopenhauer.

Schopenhauer.
Le libre arbitre. 10e édition.
Le fondement de la morale. 10e éd.
Pensées et fragments. 22e édition.
Ecrivains et style. 2e édit.
Sur la religion. 2e édit.
Philosophie et philosophes.
Ethique, droit et politique.

P. Sollier.
Les phénomènes d'autoscopie.

P. Souriau.
La rêverie esthétique.

Herbert Spencer.
Classification des sciences. 9e édit.
L'individu contre l'Etat. 8e éd.
L'association en psychologie.

Stuart Mill.
Correspondance avec G. d'Eichthal.
Auguste Comte et la philosophie positive. 8e édition.
L'utilitarisme. 5e édition.
La liberté. 3e édit.

Sully Prudhomme.
Psychologie du libre arbitre.

Sully Prudhomme et Ch. Richet.
Le probl. des causes finales. 4e éd.

Tanon.
L'évol. du droit et la consc. soc. 2e éd.

Tarde.
La criminalité comparée. 6e éd.
Les transformations du droit. 6e éd.
Les lois sociales. 5e édit.

J. Taussat.
Le monisme et l'animisme.

Thamin.
Éducation et positivisme. 2e éd.

P.-F. Thomas.
La suggestion, son rôle. 4e édit.
Morale et éducation. 2e éd.

Tissié.
Les rêves. 2e édit.

Wundt.
Hypnotisme et suggestion. 4e édit.

Zeller.
Christ. Baur et l'école de Tubingue.

Th. Ziegler.
La question sociale 3e éd.

VOLUMES IN-8.

Brochés, à 5, 7.50 et 10 fr.

Derniers volumes publiés :

J.-H. Boex-Borel.
(*J.-H. Rosny aîné*).
Le pluralisme. 5 fr.

L. Dugas.
Le problème de l'éducation. 5 fr.

A. Fouillée.
Le socialisme et la sociologie. réformiste. 7 fr. 50

Hermant et Van de Waele
Les principales théories de la logique contemporaine. 5 fr

Hubert et Mauss.
Mélanges d'histoire des religions. 5 fr.

M.-A. Leblond.
L'idéal du XIXe siècle. 5 fr.

C. Lombroso.
L'homme de génie (avec planches), 4e édit. 10 fr.

E. Naville.
Les philosophies affirmatives. 7 f. 50

G. Rodrigues.
Le problème de l'action. 3 fr. 75

F. Schiller.
Études sur l'humanisme. 10 fr.

A. Schinz.
Anti-pragmatisme. 5 fr.

P. Sollier.
Le doute. 7 fr. 50

P. Souriau.
La suggestion dans l'art. 2e édit. 5 fr.

Sully-Prudhomme.
Le lien social. 3 fr. 75

P. Tisserand.
L'anthropologie de Maine de Biran. 10 fr.

Ch. Adam.
La philosophie en France (première moitié du XIXe siècle). 7 fr. 50

Arréat.
Psychologie du peintre. 5 fr.

Dr L. Aubry.
La contagion du meurtre. 5 fr.

Alex. Bain.
La logique inductive et déductive. 5e édit. 2 vol. 20 fr.
Les sens et l'intell. 3e édit. 10 fr.

J.-M. Baldwin.
Le développement mental chez l'enfant et dans la race. 7 fr. 50

J. Bardoux.
Psychol. de l'Angleterre contemp. (*les crises belliqueuses*). 7 fr. 50
Psychologie de l'Angleterre contemporaine (*les crises politiques*). 5 fr.

Barthélemy Saint-Hilaire.
La philosophie dans ses rapports avec les sciences et la religion. 5 fr.

Barzelotti.
La philosophie de H. Taine. 7 fr. 50

A. Bayet.
L'idée de bien. 3 fr. 75

Bazaillas.
Musique et inconscience. 5 fr.
La vie personnelle. 5 fr.

G. Belot.
Études de morale positive. 7 fr. 50

H. Bergson.
Essai sur les données immédiates de la conscience. 6e édit. 3 fr. 75
Matière et mémoire. 5e édit. 5 fr.
L'évolution créatrice. 5e éd. 7 fr. 50

R. Berthelot.
Evolutionnisme et platonisme. 5 fr.

A. Bertrand.
L'enseignement intégral. 5 fr.
Les études dans la démocratie. 5 fr.

A. Binet.
Les révélations de l'écriture. 5 fr.

C. Bloch.
La philosophie de Newton. 10 fr.

Em. Boirac.
L'idée du phénomène. 5 fr.
La psychologie inconnue. 5 fr.

Bouglé.
Les idées égalitaires. 2e éd. 3 fr. 75
Essais sur le régime des castes. 5 fr.

L. Bourdeau.
Le problème de la mort. 4e éd. 5 fr.
Le problème de la vie. 7 fr. 50

Bourdon.
L'expression des émotions. 7 fr. 50

Em. Boutroux.
Études d'histoire de la philosophie. 2e édit. 7 fr. 50

Braunschvig.
Le sentiment du beau et le sentiment politique. 7 fr. 50

L. Bray.
Du beau. 5 fr.

Brochard.
De l'erreur. 2e éd. 5 fr.

M. Brunschvicg.
Spinoza. 2e édit. 3 fr. 75
La modalité du jugement. 5 fr.

L. Carrau.
Philosophie religieuse en Angleterre. 5 fr.

Ch. Chabot.
Nature et moralité. 5 fr.

A. Chide.
Le mobilisme moderne. 5 fr.

Clay.
L'alternative. 2e éd. 10 fr.

Collins.
Résumé de la phil. de H. Spencer. 4e éd. 10 fr.

Cosentini.
La sociologie génétique. 3 fr. 75

A. Coste.
Principes d'une sociol. obj. 3 fr. 75
L'expérience des peuples. 10 fr.

C. Couturat.
Les principes des mathématiques. 5 f.

Crépieux-Jamin.
L'écriture et le caractère. 5e éd. 7.50

A. Cresson.
Morale de la raison théorique. 5 fr.

Dauriac.
Essai sur l'esprit musical. 5 fr.

H. Delacroix.
Etudes d'histoire et de psychologie du mysticisme. 10 fr.

Delbos.
Philos. pratique de Kant. 12 fr. 50

J. Delvaille.
La vie sociale et l'éducation. 3 fr. 75

J. Delvolve.
Religion, critique et philosophie positive chez Bayle. 7 fr 50

Draghicesco.
L'individu dans le déterminisme social. 7 fr. 50
Le problème de la conscience. 3 fr. 75

G. Dumas.
La tristesse et la joie. 7 fr. 50
St-Simon et Auguste Comte. 5 fr.

G.-L. Duprat.
L'instabilité mentale. 5 fr.

Duproix.
Kant et Fichte. 2e édit. 5 fr.

Durand (de Gros).
Taxinomie générale. 5 fr.
Esthétique et morale. 5 fr.
Variétés philosophiques. 2e éd. 5 fr.

E. Durkheim.
De la div. du trav. soc. 2e éd. 7 fr. 50
Le suicide, étude sociolog. 7 fr. 50
L'année sociologique. 10 volumes : 1re à 5e années. Chacune. 10 fr.
6e à 10e. Chacune. 12 fr. 50

V. Egger.
La parole intérieure. 2e éd. 5 fr.

Dwelshauvers.
La synthèse mentale. 5 fr.

A. Espinas.
La philosophie sociale au XVIIIe siècle et la Révolution. 7 fr. 50

Enriques.
Les problèmes de la science et la logique. 3 fr. 75

F. Evellin.
La raison pure et les antinomies. 5 fr.

G. Ferrero.
Les lois psychologiques du symbolisme. 5 fr.

Enrico Ferri.
La sociologie criminelle. 10 fr.

Louis Ferri.
La psychologie de l'association, depuis Hobbes. 7 fr. 50

J. Finot.
Le préjugé des races. 3e éd. 7 fr. 50
Philosophie de la longévité. 12e éd. 5 fr.

Fonsegrive.
Le libre arbitre. 2e éd. 10 fr.

M. Foucault.
La psychophysique. 7 fr. 50
Le rêve. 5 fr.

Alf. Fouillée.
Liberté et déterminisme. 5e éd. 7 fr. 50
Critique des systèmes de morale contemporains. 5e éd. 7 fr. 50
La morale, l'art et la religion, d'après Guyau. 6e éd. 3 fr. 75
L'avenir de la métaphysique. 2e éd. 5 fr.

Alf. Fouillée.

Évolutionnisme des idées-forces. 4e éd. 7 fr. 50
La psychologie des idées-forces. 2e édit. 2 vol. 15 fr.
Tempérament et caractère. 3e éd. 7 fr. 50
Le mouvement idéaliste. 2e éd. 7 fr. 50
Le mouvement positiviste. 2e éd. 7.50
Psych. du peuple français. 3e éd. 7.50
La France au point de vue moral. 3e édit. 7 fr. 50
Esquisse psychologique des peuples européens. 4e édit. 10 fr.
Nietzsche et l'immoralisme. 2e éd. 5 fr.
Le moralisme de Kant et l'amoralisme contemporain. 2e éd. 7 fr. 50
Eléments sociol. de la morale. 2e édit. 7 fr. 50
La morale des idées-forces. 7 fr. 50

E. Fournière.

Théories social. au XIXe siècle. 7 fr. 50

G. Fulliquet.

L'obligation morale. 7 fr. 50

Garofalo.

La criminologie. 5e édit. 7 fr. 50
La superstition socialiste. 5 fr.

L. Gérard-Varet.

L'ignorance et l'irréflexion. 5 fr.

E. Gley.

Études de psycho-physiologie. 5 fr.

E. Goblot.

La classification des sciences. 5 fr.

G. Gory.

L'immanence de la raison dans la connaissance sensible. 5 fr.

R. de la Grasserie.

De la psychologie des religions. 5 fr.

J. Grasset.

Demi-fous et demi-responsables. 5 fr.
Introduction physiologique à l'étude de la philosophie. 5 fr.

G. de Greef.

Le transformisme social. 2e éd. 7 fr. 50
La sociologie économique. 3 fr. 75

K. Groos.

Les jeux des animaux. 7 fr. 50

Gurney, Myers et Podmore

Les hallucin. télépath. 4e éd. 7 fr. 50

Guyau.

La morale angl. cont. 5e éd. 7 fr. 50
Les problèmes de l'esthétique contemporaine. 6e éd. 5 fr.
Esquisse d'une morale sans obligation ni sanction. 9e éd. 5 fr.
L'irréligion de l'avenir. 13e éd. 7 fr. 50
L'art au point de vue sociol. 8e éd. 7 fr. 50
Éducation et hérédité. 10e éd. 5 fr.

E. Halévy.

La form. du radicalisme philos.
I. *La jeunesse de Bentham.* 7 fr. 50
II. *Evol. de la doctr. utilitaire,* 1789-1815. 7 fr. 50
III. *Le radicalisme philos.* 7 fr. 50

O. Hamelin.

Les éléments de la représentation. 7 fr. 50

Hannequin.

L'hypoth. des atomes. 2e éd. 7 fr. 50
Études d'histoire des sciences et d'histoire de la philosophie. 2 vol. 15 fr.

P. Hartenberg.

Les timides et la timidité. 2e éd. 5 fr.
Physionomie et caractère. 5 fr.

Hébert.

Evolut. de la foi catholique. 5 fr.
Le divin. 5 fr.

C. Hémon.

Philos. de Sully Prudhomme. 7 fr. 50

G. Hirth.

Physiologie de l'art. 5 fr.

H. Höffding.

Esquisse d'une psychologie fondée sur l'expérience. 4e édit. 7 fr. 50
Hist. de la philos. moderne. 2e édit. 2 vol. 20 fr.
Philosophie de la religion. 7 fr. 50

Ioteyko et Stefanowska.

Psycho et physiologie de la douleur. 5 fr.

Isambert.

Les idées socialistes en France (1815-1848). 7 fr. 50

Izoulet.

La cité moderne. 7e édit. 10 fr.

Jacoby.

La sélect. chez l'homme. 2e éd. 10 fr.

Paul Janet.

Œuvres philosophiques de Leibniz. 2e édition. 2 vol. 20 fr.

Pierre Janet.

L'automatisme psychol. 5e éd. 7 fr. 50

J. Jastrow.

La subconscience. 7 fr. 50

J. Jaurès.

Réalité du monde sensible. 2e édit. 7 fr. 50

Karppe.

Études d'hist. de la philos. 3 fr. 75

A. Keim.

Helvétius. 10 fr.

P. Lacombe.

Individus et sociétés selon Taine. 7 fr. 50

A. Lalande.

La dissolution opposée à l'évolution. 7 fr. 50

Ch. Lalo.
Esthétique musicale scientifique. 5 f.
L'esthétique expérim. cont. 3 fr. 75

A. Landry.
Principes de morale rationnelle. 5 fr.

De Lanessan.
La morale naturelle. 10 fr.
La morale des religions. 10 fr.

Lang.
Mythes, cultes et religions. 10 fr.

P. Lapie.
Logique de la volonté. 7 fr. 50

Lauvrière.
Philosophes contemporains. 2e édit. 3 fr. 75

E. de Laveleye.
De la propriété et de ses formes primitives. 5e édit. 10 fr.
Le gouvernement dans la démocratie. 3e éd. 2 vol. 15 fr.

Gustave Le Bon.
Psych. du socialisme. 5e éd. 7 fr. 50

G. Lechalas.
Études esthétiques. 5 fr.

Lechartier.
David Hume, moraliste et sociologue. 5 fr.

Leclère.
Le droit d'affirmer. 5 fr.

F. Le Dantec.
L'unité dans l'être vivant. 7 fr. 50
Limites du connaissable. 3e édit. 3 fr. 75

Xavier Léon.
La philosophie de Fichte. 10 fr.

Leroy (E.-B.).
Le langage. 5 fr.

A. Lévy.
La philosophie de Feuerbach. 10 fr.
Edgar Poë. Sa vie. Son œuvre. 10 fr.

L. Lévy-Bruhl.
La philosophie de Jacobi. 5 fr.
Lettres de Stuart Mill à Comte. 10 fr.
La philos. d'Aug. Comte. 2e éd. 7 fr. 50
La morale et la science des mœurs. 3e éd. 5 fr.

Liard.
Science positive et métaphysique. 4e édit. 7 fr. 50
Descartes. 2e édit. 5 fr.

H. Lichtenberger.
Richard Wagner, poète et penseur. 4e édit. 10 fr.
Henri Heine penseur. 3 fr. 75

Lombroso.
La femme criminelle et la prostituée 1 vol. avec planches. 15 fr.
Le crime polit. et les révol. 2 v. 15 f.
L'homme criminel. 3e édit. 2 vol., avec atlas. 36 f.
Le crime. 2e éd. 10 f.

E. Lubac.
Système de psychol. rationn. 3 fr. 75

G. Luquet.
Idées générales de psychol. 5 fr.

G. Lyon.
L'idéalisme en Angleterre au XVIIIe siècle. 7 fr. 50
Enseignement et religion. 3 fr. 75

P. Malapert.
Les éléments du caractère. 2e éd. 5 fr.

Marion.
La solidarité morale. 6e édit. 5 fr.

Fr. Martin.
La perception extérieure et la science positive. 5 fr.

J. Maxwell.
Les phénomènes psych. 4e éd. 5 fr.

E. Meyerson.
Identité et réalité. 7 fr. 50

Max Muller.
Nouv. études de mythol. 12 fr. 50

Myers.
La personnalité humaine. 2e éd. 7.50

E. Naville.
La logique de l'hypothèse. 2e éd. 5 fr.
La définition de la philosophie. 5 fr.
Les philosophies négatives. 5 fr.
Le libre arbitre. 2e édition. 5 fr.

J.-P. Nayrac.
L'attention. 3 fr. 75

Max Nordau.
Dégénérescence. 2 v. 7e éd. 17 fr. 50
Les mensonges conventionnels de notre civilisation. 10e éd. 5 fr.
Vus du dehors. 5 fr.

Novicow.
Luttes entre soc. humaines. 2e éd. 10 f.
Gaspillages des soc. mod. 2e éd. 5 fr.
Justice et expansion de la vie. 7 fr. 50

H. Oldenberg.
Le Bouddha. 2e éd. 7 fr. 50
La religion du Véda. 10 fr.

Ossip-Lourié.
La philosophie russe contemp. 5 fr.
Psychol. des romanciers russes au XIXe siècle. 7 fr. 50

Ouvré.
Form. littér. de la pensée grecq. 10 fr.

G. Palante.
Combat pour l'individu. 3 fr. 75

Fr. Paulhan.
Les caractères. 3e édition. 5 fr.
Les mensonges du caractère. 5 fr.
Le mensonge de l'art. 5 fr.

Payot.
L'éducation de la volonté. 31e éd. 5 fr.
La croyance. 2e éd. 5 fr.

Jean Pérès.
L'art et le réel. 3 fr. 75

Bernard Perez.
Les trois premières années de l'enfant. 5e édit. 5 fr.
L'enfant de 3 à 7 ans. 4e éd. 5 fr.
L'éd. mor. dès le berceau. 4e éd. 5 fr.
L'éd. intell. dès le berceau. 2e éd. 5 fr.

C. Piat.
La personne humaine. 7 fr. 50
Destinée de l'homme. 5 fr.

Picavet.
Les idéologues. 10 fr.

Piderit.
La mimique et la physiognomonie, avec 95 fig. 5 fr.

Pillon.
L'année philos. 19 vol., chacun. 5 fr.

J. Pioger.
La vie et la pensée. 5 fr.
La vie sociale, la morale et le progrès. 5 fr.

L. Prat.
Le caractère empirique et la personne. 7 fr. 50

Preyer.
Éléments de physiologie. 5 fr.

L. Proal.
Le crime et la peine. 3e éd. 10 fr.
La criminalité politique. 2e éd. 5 fr.
Le crime et le suicide passionnels. 10 fr.

G. Rageot.
Le succès. 3 fr. 75

F. Rauh.
De la méthode dans la psychologie des sentiments. 2e éd. 5 fr.
L'expérience morale. 3 fr. 75

Récéjac.
La connaissance mystique. 5 fr.

G. Renard.
La méthode scientifique de l'histoire littéraire. 10 fr.

Renouvier.
Les dilem. de la métaph. pure. 5 fr.
Hist. et solut. des problèmes métaphysiques. 7 fr. 50
Le personnalisme. 10 fr.
Critique de la doctrine de Kant. 7.50
Science de la morale. Nouvelle édit. 2 vol. 15 fr.

G. Revault d'Allonnes.
Psychologie d'une religion. 5 fr.
Les inclinations. 3 fr. 75

A. Rey.
La théorie de la physique chez les physiciens contemp. 7 fr. 50

Ribéry.
Classification des caractères. 3 fr. 75

Th. Ribot.
L'hérédité psycholog. 8e éd. 7 fr. 50
La psychologie anglaise contemporaine. 3e éd. 7 fr. 50
La psychologie allemande contemporaine. 6e éd. 7 fr. 50
La psych. des sentim. 7e éd. 7 fr. 50
L'évol. des idées générales. 2e éd. 5 fr.
L'imagination créatrice. 3e éd. 5 fr.
Logique des sentiments. 2e éd. 3 f. 75
Essai sur les passions. 2e éd. 3 fr. 75

Ricardou.
De l'idéal. 5 fr.

G. Richard.
L'idée d'évolution dans la nature et dans l'histoire. 7 fr. 50

H. Riemann.
Elém. de l'esthétiq. musicale. 5 fr.

E. Rignano.
Transmissibilité des caractères acquis. 5 fr.

A. Rivaud.
Essence et existence chez Spinoza. 7 fr. 50

E. de Roberty.
Ancienne et nouvelle philos. 7 fr. 50
La philosophie du siècle. 5 fr.
Nouveau programme de sociol. 5 fr.
Sociologie de l'action. 3 fr. 75

F. Roussel-Despierres.
Liberté et beauté. 7 fr. 50

Romanes.
L'évol. ment. chez l'homme. 7 fr. 50

Russell.
La philosophie de Leibniz. 3 fr. 75

Ruyssen.
Évolut. psychol. du jugement. 5 fr.

A. Sabatier.
Philosophie de l'effort. 2e éd. 7 fr. 50

Emile Saigey.
La physique de Voltaire. 5 fr.

G. Saint-Paul.
Le langage intérieur. 5 fr.

E. Sanz y Escartin.
L'individu et la réforme sociale. 7.50

Schopenhauer.
Aphorismes sur la sagesse dans la vie. 9e éd. 5 fr.
Le monde comme volonté et représentation. 5e éd. 3 vol. 22 fr. 50

Séailles.
Ess. sur le génie dans l'art. 2e éd. 5 fr.
Philosoph. de Renouvier. 7 fr. 50

Sighele.
La foule criminelle. 2e édit. 5 fr.

Sollier.
Psychologie de l'idiot et de l'imbécile. 2e éd. 5 fr.
Le problème de la mémoire. 3 fr. 75
Le mécanisme des émotions. 5 fr.

Souriau.

L'esthétique du mouvement. 5 fr.
La beauté rationnelle. 10 fr.

Spencer (Herbert).

Les premiers principes. 9e éd. 10 fr.
Principes de psychologie. 2 vol. 20 fr.
Princip. de biologie. 5e éd. 2 v. 20 fr.
Princip. de sociol. 5 vol. 43 fr. 75
I. *Données de la sociologie*, 10 fr. — II. *Inductions de la sociologie. Relations domestiques*, 7 fr. 50. — III. *Institutions cérémonielles et politiques*, 15 fr. — IV. *Institutions ecclésiastiques*, 3 fr. 75. — V. *Institutions professionnelles*, 7 fr. 50.
Justice. 3e éd. 7 fr. 50
Rôle moral de la bienfaisance. 7.50
Morale des différents peuples. 7.50
Problèmes de morale et de sociologie. 2e éd. 7 fr. 50
Essais sur le progrès. 5e éd. 7 fr. 50
Essais de politique. 4e éd. 7 fr. 50
Essais scientifiques. 3e éd. 7 fr. 50
De l'éducation. 13e édit. 5 fr.
Une autobiographie. 10 fr.

P. Stapfer.

Questions esthétiques et religieuses 3 fr. 75

Stein.

La question sociale au point de vue philosophique. 10 fr.

Stuart Mill.

Mes mémoires. 5e éd. 5 fr.
Système de logique. 2 vol. 20 fr.
Essais sur la religion. 4e édit. 5 fr.
Lettres à Auguste Comte. 10 fr.

James Sully.

Le pessimisme. 2e éd. 7 fr. 50
Etudes sur l'enfance. 10 fr.
Essai sur le rire. 7 fr. 50

Sully Prudhomme.

La vraie religion selon Pascal. 7 f. 50

G. Tarde.

La logique sociale. 3e édit. 7 fr. 50
Les lois de l'imitation. 5e éd. 7 fr. 50
L'opposition universelle. 7 fr. 50
L'opinion et la foule. 2e édit. 5 fr.
Psychologie économique. 2 vol. 15 fr.

Em. Tardieu.

L'ennui. 5 fr.

P.-Félix Thomas.

L'éducation des sentiments. 4e éd. 5 fr
Pierre Leroux. Sa philosophie. 5 fr.

Et. Vacherot.

Essais de philosophie critique. 7 f. 50
La religion. 7 fr. 50

I. Waynbaum

La physionomie humaine. 5 fr.

L. Weber.

Vers le positivisme absolu par l'idéalisme. 7 fr. 50

REVUE PHILOSOPHIQUE

de la France et de l'Étranger

DIRIGÉE par **Th. RIBOT**,

Membre de l'Institut, Professeur honoraire au Collège de France.

34e année, 1909. — PARAIT TOUS LES MOIS.

Abonnement : Un an : Paris, **30** fr. ; Départ. et Etranger, **33** fr.
La livraison, **3** fr.

JOURNAL DE PSYCHOLOGIE

Normale et pathologique

DIRIGÉ PAR LES DOCTEURS

Pierre JANET et **G. DUMAS**

Professeur de psychologie au Collège de France. — Chargé de cours à la Sorbonne.

6e année, 1909. — PARAIT TOUS LES DEUX MOIS.

ABONNEMENT : Un an, du 1er janvier, **14** fr.
La livraison, **2** fr. **60**.

ÉCONOMIE POLITIQUE — SCIENCE FINANCIÈRE

JOURNAL DES ÉCONOMISTES

REVUE MENSUELLE DE LA SCIENCE ÉCONOMIQUE ET DE LA STATISTIQUE

Fondé en 1841, par G. Guillaumin

Paraît le 15 de chaque mois

par fascicules grand in-8 de 10 à 12 feuilles (180 à 192 pages).

RÉDACTEUR EN CHEF : **M. G. DE MOLINARI**
Correspondant de l'Institut.

CONDITIONS DE L'ABONNEMENT :

France et Algérie : UN AN..... **36** fr.; SIX MOIS..... **19** fr.;
Union postale : UN AN..... **38** fr.; SIX MOIS..... **20** fr.
LE NUMÉRO..... **3** fr. **50**

Les abonnements partent de Janvier ou de Juillet.

NOUVEAU DICTIONNAIRE
D'ÉCONOMIE POLITIQUE

PUBLIÉ SOUS LA DIRECTION DE

M. LÉON SAY et de **M. JOSEPH CHAILLEY-BERT**

Deuxième édition.

2 vol. grand in-8 raisin et un Supplément : prix, brochés..... **60** fr.
— — — demi-reliure chagrin..... **69** fr.

COMPLÉTÉ PAR 3 TABLES : **Table des auteurs, table méthodique et table analytique.**

Cet important ouvrage peut s'acquérir en envoyant un mandat-poste de 20 fr., au reçu duquel est faite l'expédition du livre, et en payant le reste, soit 40 fr., en quatre traites de 10 fr. chacune, de deux mois en deux mois. (*Pour recevoir l'ouvrage relié ajouter 9 fr. au premier paiement.*)

DICTIONNAIRE DU COMMERCE
DE L'INDUSTRIE ET DE LA BANQUE

DIRECTEURS :

MM. Yves GUYOT et Arthur RAFFALOVICH

2 volumes grand in-8. Prix, brochés..... 50 fr.
— — reliés..... 58 fr.

Cet important ouvrage peut s'acquérir en envoyant un mandat-poste de 10 fr., au reçu duquel est faite l'expédition du livre, et en payant le reste, soit 40 fr., en quatre traites de 10 fr. chacune, de deux mois en deux mois. (*Pour recevoir l'ouvrage relié ajouter 8 fr. au premier paiement.*)

COLLECTION DES PRINCIPAUX ÉCONOMISTES

Enrichie de commentaires, de notes explicatives et de notices historiques

(Collection Guillaumin.)

MÉLANGES (1re partie)

David Hume. *Essai sur le commerce, le luxe, l'argent, les impôts, le crédit public, sur la balance du commerce, la jalousie commerciale, la population des nations anciennes.* — **V. de Forbonnais.** *Principes économiques.* — **Condillac.** *Le commerce et le gouvernement.* — **Condorcet.** *Lettres d'un laboureur de Picardie à M. N**** (Necker). — *Réflexions sur l'esclavage des nègres.* — *Réflexions sur la justice criminelle.* — *De l'influence de la révolution d'Amérique sur l'Europe.* — *De l'impôt progressif.* — **Lavoisier.** *De la richesse territoriale du royaume de France.* — **Franklin.** *La science du bonhomme Richard* et ses autres opuscules. 1 vol. grand in-8. . . . . 10 fr.

MÉLANGES (2e partie)

Necker. *Sur la législation et le commerce des grains.* — **L'abbé Galiani.** *Dialogues sur le commerce des blés* avec la *Réfutation* de l'abbé **Morellet.** — **Montyon.** *Quelle influence ont les diverses espèces d'impôts sur la moralité, l'activité et l'industrie des peuples?* — **Bentham.** *Défense de l'usure.* 1 vol. gr. in-8. . . . . 10 fr.

RICARDO

Œuvres complètes. Les œuvres de Ricardo se composent : 1° des Principes de l'économie politique et de l'impôt. — 2° Des ouvrages ci-après : *De la protection accordée à l'agriculture.* — *Plan pour l'établissement d'une banque nationale.* — *Essai sur l'influence du bas prix des blés sur les profits du capital.* — *Proposition pour l'établissement d'une circulation monétaire économique et sûre.* — *Le haut prix des lingots est une preuve de la dépréciation des billets de banque.* — *Essai sur les emprunts publics*, avec des *notes.* 1 vol. in-8. . . . . 10 fr.

J.-B. SAY

Cours complet d'économie politique pratique. 2 vol. grand in-8. 20 fr.

J.-B. SAY

Œuvres diverses : *Catéchisme d'économie politique.* — *Lettres à Malthus et correspondance générale.* — *Olbie.* — *Petit volume.* — *Fragments et opuscules inédits.* 1 vol. grand in-8. . . . . 10 fr.

ADAM SMITH

Recherches sur la nature et les causes de la richesse des nations, traduction de G. Garnier. 5e édition, augmentée. 2 vol. in-8. . . 16 fr.

COLLECTION DES ÉCONOMISTES
ET PUBLICISTES CONTEMPORAINS

FORMAT IN-8.

VOLUMES RÉCEMMENT PUBLIÉS :

ANTOINE (Ch.). **Cours d'économie sociale.** 4e édition, revue et augmentée. 1 vol. in-8. . . . . 9 fr.

ARNAUNÉ (Aug.), ancien directeur de la Monnaie, conseiller maître à la Cour des comptes. **La monnaie, le crédit et le change.** 1 vol. in-8. 4e édition, revue et augmentée. . . . . 8 fr.

COLSON (C.), ingénieur en chef des ponts et chaussées. **Cours d'économie politique,** professé à l'École nationale des ponts et chaussées. 6 vol. grand in-8. . . . . 36 fr.

Livre I. — *Théorie générale des phénomènes économiques.* 2e édition revue et augmentée. . . . . 6 fr.

— II. — *Le travail et les questions ouvrières.* 3e tirage. . . 6 fr.

— III. — *La propriété des biens corporels et incorporels.* 2e tirge. 6 fr.

— IV. — *Les entreprises, le commerce et la circulation.* 2e tirge. 6 fr.

— V. — *Les finances publiques et le budget de la France.* . 6 fr.

— VI. — *Les travaux publics et les transports.* . . . . . 6 fr.

— SUPPLÉMENT ANNUEL (1909) au *Livre du Cours d'Économie politique.* broch. in-8 . . . . . » fr. 75

COURCELLE-SENEUIL, de l'Institut. **Traité théorique et pratique des opérations de banque.** *Dixième édition, revue et mise à jour,* par A. LIESSE, professeur au Conservatoire des arts et métiers. 1 vol. in-8. . . . . 9 fr.

EICHTHAL (Eugène d'), de l'Institut. **La formation des richesses et ses conditions sociales actuelles,** *notes d'économie politique.* . . 7 fr. 50

LEROY-BEAULIEU (P.), de l'Institut. **Le collectivisme,** *examen critique du nouveau socialisme. — L'Evolution du Socialisme depuis 1895. — Le syndicalisme.* 5e édit., revue et augmentée 1 v. in-8. . . . . 9 fr.

— **De la colonisation chez les peuples modernes.** 6e édition. 2 vol. in-8 . . . . . 20 fr.

MARTIN-SAINT-LÉON (E.), conservateur de la bibliothèque du Musée Social. **Histoire des corporations de métiers,** *depuis leurs origines jusqu'à leur suppression en 1791,* suivie d'une étude sur l'*Évolution de l'Idée corporative de 1791 à nos jours* et sur le *Mouvement syndical contemporain.* Deuxième édition, revue et mise au courant. 1 fort vol. in-8. (*Couronné par l'Académie française*) . . . . . 10 fr.

NOVICOW (J.). **Le problème de la misère et les phénomènes économiques naturels.** 1 vol. in-8. . . . . 7 fr. 50

STOURM (R.), de l'Institut, professeur à l'École libre des sciences politiques. *Cours de finances.* **Le budget, son histoire et son mécanisme.** 6e édition. 1 vol. in-8. . . . . 10 fr.

BANFIELD, Professeur à l'Université de Cambridge. **Organisation de l'industrie,** traduit sur la 2e édition, et annoté par M. EMILE THOMAS. 1 vol. in-8. . . . . 6 fr.

BAUDRILLART (H.), de l'Institut. **Philosophie de l'économie politique. Des rapports de l'économie politique et de la morale.** Deuxième édition, revue et augmentée. 1 vol. in-8. . . . . 9 fr.

BLANQUI, de l'Institut. **Histoire de l'économie politique en Europe,** *depuis les Anciens jusqu'à nos jours,* 5e édition. 1 vol. in-8. . . 8 fr.

BLOCK (M.), de l'Institut. **Les progrès de la science économique** depuis ADAM SMITH. 2e édit. augmentée. 2 vol. in-8 . . . . . 16 fr.

BLUNTSCHLI. **Le droit international codifié.** Traduit de l'allemand par M. C. LARDY. 5e édition, revue et augmentée. 1 vol. in-8. . . . 10 fr.

— **Théorie générale de l'Etat,** traduit de l'allemand par M. DE RIEDMATTEN. 3e édition. 1 vol. in-8.. . . . . 9 fr.

COURCELLE-SENEUIL, de l'Institut. **Traité théorique et pratique d'économie politique.** 3e édition, revue et corrigée. 2 vol. in-18. 7 fr.

COURTOIS (A.). **Histoire des banques en France.** 2e édition. 1 vol. in-8. . . . . 8 fr. 50

FAUCHER (L.), de l'Institut. **Études sur l'Angleterre.** 2e édition augmentée. 2 forts volumes in-8. . . . . 6 fr.

FIX (Th.). **Observations sur l'état des classes ouvrières.** Nouvelle édition. 1 vol. in-8. . . . . 5 fr.

GROTIUS. **Le droit de la guerre et de la paix.** Nouvelle traduction. 3 vol. in-8. . . . . 12 fr. 50

HAUTEFEUILLE. **Des droits et des devoirs des nations neutres en temps de guerre maritime.** 3e édit. refondue. 3 forts vol. in-8. 22 fr. 50

— **Histoire des origines, des progrès et des variations du droit maritime international.** 2e édition. 1 vol. in-8. . . . . 7 fr. 50

LEROY-BEAULIEU (P.), de l'Institut. **Traité théorique et pratique d'économie politique.** 4e édition. 4 vol. in-8. . . . . 36 fr.

— **Traité de la science des finances.** 7e édition, revue, corrigée et augmentée. 2 forts vol. in-8. . . . . 25 fr.

— **Essai sur la répartition des richesses et sur la tendance à une moindre inégalité des conditions.** 3e édit., revue et corrigée. 1 vol. in-8. 9 fr.

— **L'État moderne et ses fonctions.** 3e édition. 1 vol. in-8. . . . 9 fr.

LIESSE (A.), professeur au Conservatoire national des arts et métiers. **Le travail** *aux points de vue scientifique, industriel et social.* 1 vol. in-8. . . . . 7 fr. 50

MORLEY (John). **La vie de Richard Cobden,** traduit par SOPHIE RAFFALOVICH. 1 vol. in-8. . . . . 8 fr.

NEYMARCK (A.). **Finances contemporaines.** — Tome I. *Trente années financières, 1872-1901.* 1 vol. in-8, 7 fr. 50. — Tome II. *Les budgets, 1872-1903.* 1 vol. in-8, 7 fr. 50. — Tome III. *Questions économiques et financières, 1872-1904.* 1 vol. in-8, 10 fr. — Tomes IV-V : *L'obsession fiscale, questions fiscales, propositions et projets relatifs aux impôts depuis 1871 jusqu'à nos jours.* 2 vol. in-8 (1907). . . . . 15 fr.

PASSY (H.), de l'Institut. **Des formes de gouvernement et des lois qui les régissent.** 2e édition. 1 vol. in-8. . . . . 7 fr. 50

PAUL-BONCOUR. **Le fédéralisme économique et le syndicalisme obligatoire,** préface de WALDECK-ROUSSEAU. 1 vol. in-8. 2e édit . . 6 fr.

PRADIER-FODERÉ. **Précis de droit administratif.** 7e édition, tenue au courant de la législation. 1 fort vol. in-8. . . . . 10 fr.

RAFFALOVICH (A.). **Le marché financier. France, Angleterre, Allemagne,** Russie, Autriche, Japon, Suisse, Italie, Espagne, États-Unis. Questions monétaires. Métaux précieux. Années 1894-1895. 1 vol. 7 fr. 50; 1895-1896. 1 vol. 7 fr. 50; 1896-1897. 1 vol. 7 fr. 50; 1897-1898 à 1901-1902, chacune 1 vol. 10 fr.; 1902-1903 à 1907-1908, chacune 1 vol. . 12 fr.

RICHARD (A.). **L'organisation collective du travail,** essai sur la coopération de main-d'œuvre, le contrat collectif et la sous-entreprise ouvrière, préface par Yves GUYOT. 1 vol. grand in-8. . . . . 6 fr.

ROSSI (P.), de l'Institut. **Cours d'économie politique,** revu et augmenté de leçons inédites. 5e édition. 4 vol. in-8. . . . . 15 fr.

— **Cours de droit constitutionnel,** *professé à la Faculté de droit de Paris,* recueilli par M. A. PORÉE. 2e édition. 4 vol. in-8. . . . . 15 fr.

STOURM (R.), de l'Institut. **Les systèmes généraux d'impôts.** 2e édition revisée et mise au courant. 1 vol. in-8. . . . . 9 fr.

VIGNES (Édouard). **Traité des impôts en France.** 4e édition, mise au courant de la législation, par M. VERGNIAUD. 2 vol. in-8. . . . 16 fr.

BIBLIOTHÈQUE DES SCIENCES MORALES ET POLITIQUES

FORMAT IN-18 JÉSUS.

Volumes récemment publiés.

AUCUY (M.). **Les systèmes socialistes d'échange.** Avant-propos de M. A. DESCHAMPS, professeur à la Faculté de Droit de Paris. 1 volume in-16 . . . . . 3 fr. 50

CHALLAYE. **Syndicalisme révolutionnaire et syndicalisme réformiste.** 1 vol. in-16. . . . . 2 fr. 50

DOLLÉANS. **Robert Owen (1771-1858).** Avant-propos de M. É. FAGUET, de l'Académie française. 1 vol. in-18, avec gravures. . . . . 3 fr. 50

EICHTHAL (E. d'), de l'Institut. **La liberté individuelle du travail et les menaces du législateur.** 1 vol. in-16. . . . . 2 fr. 50

Forces productives de la France (Les). Conférences organisées par la Société des anciens élèves de l'École libre des sciences politiques, par MM. P. BAUDIN, P. LEROY-BAULIEU, MILLERAND, ROUME, J. THIERRY, E. ALLIX, J.-C. CHARPENTIER, H. DE PEYERIMHOFF, P. DE ROUSIERS, D. ZOLLA. 1 vol. in-16. . . . . 3 fr. 50

GAUTHIER (A.-E.), sénateur, ancien ministre. **La réforme fiscale par l'impôt sur le revenu.** 1 vol. in-18. . . . . 3 fr. 50

LIESSE, professeur au Conservatoire des arts et métiers. **La statistique, ses difficultés, ses procédés, ses résultats.** 1 vol. in-18. . . 2 fr. 50

— **Portraits de financiers.** OUVRARD, MOLLIEN, GAUDIN, BARON LOUIS, CORVETTO, LAFFITE, DE VILLÈLE. 1 vol. in-18. . . . . 3 fr. 50

MARGUERY (E.). **Le droit de propriété et le régime démocratique.** 1 vol. in-18. . . . . 2 fr. 50

MERLIN (R.), biblioth. archiviste du Musée social. **Le contrat de travail, les salaires, la participation aux bénéfices.** 1 v. in-18. . . . 2 fr. 50

MILHAUD (Mlle Caroline). **L'ouvrière en France,** *sa condition présente, réformes nécessaires.* 1 vol. in-18. . . . . 2 fr. 50

MILHAUD (Edg.), professeur d'économie politique à l'Université de Genève. **L'imposition de la rente.** *Les engagements de l'Etat, les intérêts du crédit public, l'égalité devant l'impôt.* 1 vol. in-16. . 3 fr. 50

MOLINARI (G. de), correspondant de l'Institut, rédacteur en chef du *Journal des Économistes*. **Théorie de l'Evolution.** *Économie de l'histoire.* 1 vol. in-16. . . . . 3 fr. 50

PIC (P.), professeur de législation industrielle à l'Université de Lyon. **La protection légale des travailleurs et le droit international ouvrier.** 1 vol. in-16 . . . . . 2 fr. 50

BASTIAT (Frédéric). **Œuvres complètes,** précédées d'une *Notice* sur sa vie et ses écrits. 7 vol. in-18. . . . . 24 fr. 50

I. *Correspondance.* — *Premiers écrits.* 3e édition, 3 fr. 50; — II. *Libre-Echange.* 3e édition, 3 fr. 50; — III. *Cobden et la Ligue.* 4e édition, 2 fr. 50; — IV et V. *Sophismes économiques.* — *Petits pamphlets.* 6e édit. 2 vol., 7 fr.; — VI. *Harmonies économiques.* 9e édition, 3 fr. 50; — VII. *Essais.* — *Ébauches.* — *Correspondance.* . . . . . 3 fr. 50

Les tomes IV et V seuls ne se vendent que réunis.

CIESZKOWSKI (A.). **Du crédit et de la circulation.** 3e édit. in-18. 3 fr. 50

COURCELLE-SENEUIL (J.-G.). **Traité théorique et pratique d'économie politique.** 3e édit. 2 vol. in-18. . . . . 7 fr.

— **La société moderne.** 1 vol. in-18. . . . . 5 fr.

FREEMAN (E.-A.). **Le développement de la constitution anglaise,** depuis les temps les plus reculés jusqu'à nos jours. 1 vol. in-18. . . 3 fr. 50

LAVERGNE (L. de), de l'Institut. **Economie rurale de la France depuis 1789.** 4e édition, revue et augmentée. 1 vol. in-18. . . . . 3 fr. 50

— **L'agriculture et la population.** 2e édition. 1 vol. in-18. . . . 3 fr. 50

MOLINARI (G. de), correspondant de l'Institut, rédacteur en chef du *Journal des Économistes*. **Questions économiques à l'ordre du jour.** 1 vol. in-18 . . . . . 3 fr. 50

— **Les problèmes du XXe siècle.** 1 vol. in-18. . . . . 3 fr. 50

STUART MILL (J.). **Le gouvernement représentatif.** Traduction et *Introduction*, par M. DUPONT-WHITE. 3e édition. 1 vol. in-18. 4 fr.

COLLECTION
D'AUTEURS ÉTRANGERS CONTEMPORAINS

Histoire — Morale — Économie politique — Sociologie

Format in-8. (Pour le cartonnage, **1** fr. **50** en plus.)

BAMBERGER. — **Le Métal argent au XIXe siècle.** Traduction par M. Raphael-Georges Lévy. 1 vol. Prix, broché . . . . . 6 fr. 50

C. ELLIS STEVENS. — **Les Sources de la Constitution des États-Unis** *étudiées dans leurs rapports avec l'histoire de l'Angleterre et de ses Colonies.* Traduit par Louis Vossion. 1 vol. in-8. Prix, broché. 7 fr. 50

GOSCHEN. — **Théorie des Changes étrangers.** Traduction et préface de M. Léon Say. *Quatrième édition française* suivie du *Rapport de 1875 sur le paiement de l'indemnité de guerre*, par le même. 1 vol. Prix, broché . . . . . 7 fr. 50

HERBERT SPENCER. — **Justice.** *3e édition.* Trad. de M. E. Castelot. 1 vol. Prix, broché . . . . . 7 fr. 50

HERBERT SPENCER. — **La Morale des différents Peuples et la Morale personnelle.** Traduction de MM. Castelot et E. Martin Saint-Léon. 1 vol. Prix, broché . . . . . 7 fr. 50

HERBERT SPENCER. — **Les Institutions professionnelles et industrielles.** Traduit par Henri de Varigny. 1 vol. in-8. Prix, br. 7 fr. 50

HERBERT SPENCER. — **Problèmes de Morale et de Sociologie.** Traduction de M. H. de Varigny. 2e édit. 1 vol. Prix, broché. . 7 fr. 50

HERBERT SPENCER. — **Du Rôle moral de la Bienfaisance.** (*Dernière partie des principes de l'éthique*). Traduction de MM. E. Castelot et E. Martin Saint-Léon. 1 vol. Prix, broché . . . . . 7 fr. 50

HOWELL. — **Le Passé et l'Avenir des Trade Unions.** *Questions sociales d'aujourd'hui.* Traduction et préface de M. Le Cour Grandmaison. 1 vol. Prix, broché . . . . . 5 fr. 50

KIDD. — **L'évolution sociale.** Traduit par M. P. Le Monnier. 1 vol. in-8. Prix, broché. . . . . 7 fr. 50

NITTI. — **Le Socialisme catholique.** Traduit avec l'autorisation de l'auteur. 1 vol. Prix, broché . . . . . 7 fr. 50

RUMELIN. — **Problèmes d'Économie politique et de Statistique.** Traduit par Ar. de Riedmatten. 1 vol. Prix, broché. . . . . 7 fr. 50

SCHULZE GAVERNITZ. — **La grande Industrie.** Traduit de l'allemand. Préface par M. G. Guéroult. 1 vol. Prix, broché. . . . . 7 fr. 50

W.-A. SHAW. — **Histoire de la Monnaie (1252-1894).** Traduit par M. Ar. Raffalovich. 1 vol. Prix, broché . . . . . 7 fr. 50

THOROLD ROGERS. — **Histoire du Travail et des Salaires en Angleterre depuis la fin du XIIIe siècle.** Traduction avec notes par E. Castelot. 1 vol. in-8. Prix, broché . . . . . 7 fr. 50

WESTERMARCK. — **Origine du Mariage dans l'espèce humaine.** Traduction de M. H. de Varigny. 1 vol. Prix broché. . . . . 11 fr.

A.-D. WHITE. — **Histoire de la Lutte entre la Science et la Théologie.** Traduit et adapté par MM. H. de Varigny et G. Adam. 1 vol. in-8. Prix, broché . . . . . 7 fr. 50

PETITE BIBLIOTHÈQUE
ÉCONOMIQUE
FRANÇAISE ET ÉTRANGÈRE

PUBLIÉE SOUS LA DIRECTION DE M. J. CHAILLEY-BERT

PRIX DE CHAQUE VOLUME IN-32, ORNÉ D'UN PORTRAIT
Cartonné toile. . . . . 2 fr. 50

XVIII VOLUMES PUBLIÉS

I. — VAUBAN. — Dîme royale, par G. MICHEL.
II. — BENTHAM. — Principes de Législation, par Mlle RAFFALOVICH.
III. — HUME. — Œuvre économique, par Léon SAY.
IV. — J.-B. SAY. — Economie politique, par H. BAUDRILLART, de l'Institut.
V. — ADAM SMITH. — Richesse des Nations, par COURCELLE-SENEUIL, de l'Institut. 2e édit.
VI. — SULLY. — Économies royales, par M. J. CHAILLEY-BERT.
VII. — RICARDO. — Rentes, Salaires et Profits, par M. P. BEAUREGARD, de l'Institut.
VIII. — TURGOT. — Administration et Œuvres économiques, par M. L. ROBINEAU.
IX. — JOHN-STUART MILL. — Principes d'économie politique, par M. L. ROQUET.
X. — MALTHUS. — Essai sur le principe de population, par M. G. de MOLINARI.
XI. — BASTIAT. — Œuvres choisies, par M. de FOVILLE, de l'Institut. 2e édit.
XII. — FOURIER. — Œuvres choisies, par M. Ch. GIDE.
XIII. — F. LE PLAY. — Économie sociale, par M. F. AUBURTIN. Nouvelle édit.
XIV. — COBDEN. — Ligue contre les lois, Céréales et Discours politiques, par Léon SAY, de l'Académie française.
XV. — KARL MARX. — Le Capital, par M. VILEFREDO PARETO. 3e édit.
XVI. — LAVOISIER. — Statistique agricole et projets de réformes, par MM. SCHELLE et Ed. GRIMAUX, de l'Institut.
XVII. — LÉON SAY. — Liberté du Commerce, finances publiques, par M. J. CHAILLEY-BERT.
XVIII. — QUESNAY. — La Physiocratie, par M. Yves GUYOT.

Chaque volume est précédé d'une introduction et d'une étude biographique, bibliographique et critique sur chaque auteur.

597-09. — Coulommiers. Imp. Paul BRODARD. — P6-09.

FÉLIX ALCAN, éditeur, 108, boulevard Saint Germain, Paris (6e)

NOUVELLE
COLLECTION SCIENTIFIQUE

Directeur, ÉMILE BOREL

VOLUMES IN-16 A 3 FR. 50 L'UN.

Éléments de Philosophie Biologique, par F. LE DANTEC, chargé du cours de biologie générale à la Sorbonne. 1 vol. in-16, 2e édition . . . . . 3 fr. 50

La Voix. *Sa culture physiologique. Théorie nouvelle de la phonation*, par le Dr P. BONNIER, laryngologiste de la clinique médicale de l'Hôtel-Dieu. 3e édition. 1 vol. in-16 illustré. . . . . 3 fr. 50

De la Méthode dans les Sciences :

1. *Avant-propos*, par M. P.-F. THOMAS, docteur ès lettres, professeur de philosophie au lycée Hoche. — 2. *De la science*, par M. ÉMILE PICARD, de l'Institut. — 3. *Mathématiques pures*, par M. J. TANNERY, de l'Institut. — 4. *Mathématiques appliquées*, par M. PAINLEVÉ, de l'Institut. — 5. *Physique générale*, par M. BOUASSE, professeur à la Faculté des Sciences de Toulouse. — 6. *Chimie*, par M. JOB, professeur au Conservatoire des Arts et Métiers. — 7. *Morphologie générale*, par A. GIARD, de l'Institut. — 8. *Physiologie*, par M. LE DANTEC, chargé de cours à la Sorbonne. — 9. *Sciences médicales*, par M. PIERRE DELBET, professeur à la Faculté de médecine de Paris. — 10. *Psychologie*, par M. TH. RIBOT, de l'Institut. — 11. *Sciences médicales*, par M. DURKHEIM, professeur à la Sorbonne. — 12. *Morale*, par M. LÉVY-BRUHL, professeur à la Sorbonne. — 13. *Histoire*, par M. G. MONOD, de l'Institut. 2e édition. 1 vol. in-16. . . . . 3 fr. 50

L'Education dans la Famille. *Les péchés des parents*, par P.-F. THOMAS, professeur au lycée Hoche. 3e édition. 1 vol. in-16. (*Couronné par l'Institut*). . . . 3 fr. 50

La Crise du Transformisme, par F. LE DANTEC. 1 vol. in-16. . . . . 3 fr. 50

L'Energie, par W. OSTWALD, professeur à l'Université de Leipzig, traduit de l'allemand par *E. Philippi*, licencié ès sciences. 2e édition. 1 vol. in-16. . . . 3 fr. 50

Les Etats physiques de la Matière, par CH. MAURAIN, professeur à la Faculté des sciences de Caen. 1 vol. in-16 . . . . . 3 fr 50

La Chimie de la Matière vivante, par JACQUES DUCLAUX, préparateur à l'Institut Pasteur. 1 vol. in-16. . . . . 3 fr. 50

A LA MÊME LIBRAIRIE

LA REVUE DU MOIS

DIRECTEUR : ÉMILE BOREL

Paraît le 10 de chaque mois depuis le 10 Janvier 1906
par livraisons de 128 pages grand in-8° (25 × 16)
Chaque année forme deux volumes de 750 à 800 pages chacun

La Revue du Mois, qui est entrée en janvier 1910 dans sa cinquième année, suit avec attention dans toutes les parties du savoir, le mouvement des idées. Rédigée par des spécialistes éminents, elle a pour objet de tenir sérieusement au courant tous les esprits cultivés. Dans des articles de fond nombreux et variés, elle dégage les résultats les plus généraux et les plus intéressants de chaque ordre de recherches, ceux qu'on ne peut ni ne doit ignorer. Dans des notes plus courtes, elle fait place aux discussions, elle signale et critique les articles de Revues, les livres qui méritent intérêt.

ABONNEMENT

Un an, Paris. 20 francs. — Départements. 22 francs. — Union postale. 25 francs.
Six mois, — 10 francs. — 11 francs. — 12 fr. 50

La livraison : 2 fr. 25

197-10. — Coulommiers. Imp. PAUL BRODARD. — 3-10.